CAMBIAMENTI CLIMATICI e PALEOCLIMATOLOGIA: il RUOLO della GEOLOGIA

Isabella Raffi
Dipartimento di Ingegneria e Geologia

Incipit

«To a patient scientist, the unfolding greenhouse mystery is far more exciting than the plot of the best mystery novel.

But it is slow reading, with new clues sometimes not appearing for several years.

Impatience increases when one realizes that it is not the fate of some fictional character, but of our planet and species, which hangs in the balance as the great carbon mystery unfolds at a seemingly glacial pace.»

D. Schindler, 1999, *Nature* 398: 105-106.

La GEOLOGIA e il CLIMA

La Geologia, nata sostanzialmente all'inizio dell''800, fin dai suoi albori, pur con strumenti semplici, ci ha insegnato già molto sul clima:

1. IL CLIMA CAMBIA "NATURALMENTE" IN MODO MOLTO VISTOSO:
   - REGIME GLACIALE (esempio: QUATERNARIO- negli ultimi ~ 900.000 anni)
   - REGIME di CALDO GLOBALE (esempio: CRETACICO – ~ 100 m.yr.)

alla scala dei tempi «geologici»

La GEOLOGIA e il CLIMA

In tempi più recenti (e con ben altri mezzi) ci ha dato altre informazioni "sorprendenti":

2. IL CLIMA E' "NATURALMENTE" MOLTO VARIABILE e i CAMBIAMENTI POSSONO ESSERE RAPIDI e IMPROVVISI (esempio: HEINRICH EVENTS durante l'ULTIMO GLACIALE) in tempi dell'ordine di decine e centinaia di anni.

I "tempi" coinvolti in 1) sono "geologici" : centinaia di migliaia e milioni di anni: non preoccupano molto!

I "tempi" coinvolti in in 2) sono le decine e centinaia di anni, e quindi…

PAROLE CHIAVE:

Clima, CO_2, Riscaldamento globale, Oceani

Il clima è un sistema complesso e difficile.

Perchè guardiamo il passato geologico?

Il passato è la chiave per capire il futuro

CLIMA e PALEOCLIMATOLOGIA

Con semplificazioni, si utilizzano modelli matematici sempre piu' sofisticati, con l'uso di supercomputer per capire i meccanismi e fare previsioni.

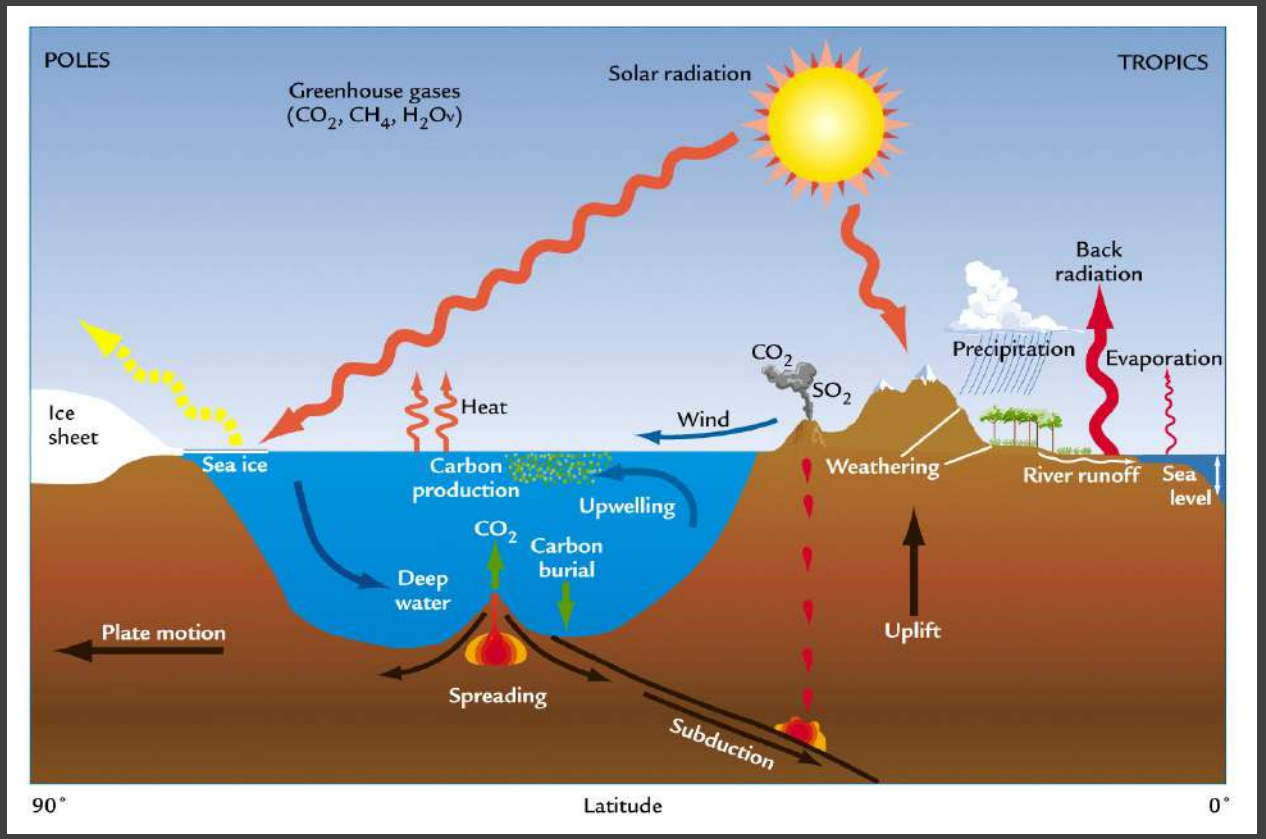
Non si possono fare esperimenti in laboratorio!

I risultati sono spesso contradditori, e possono essere verificati solo guardando al passato.

La strategia seguita e' verificare nel passato geologico (PALEOCLIMATOLOGIA)

Il Passato è la chiave per capire il Futuro!

IL SISTEMA CLIMATICO



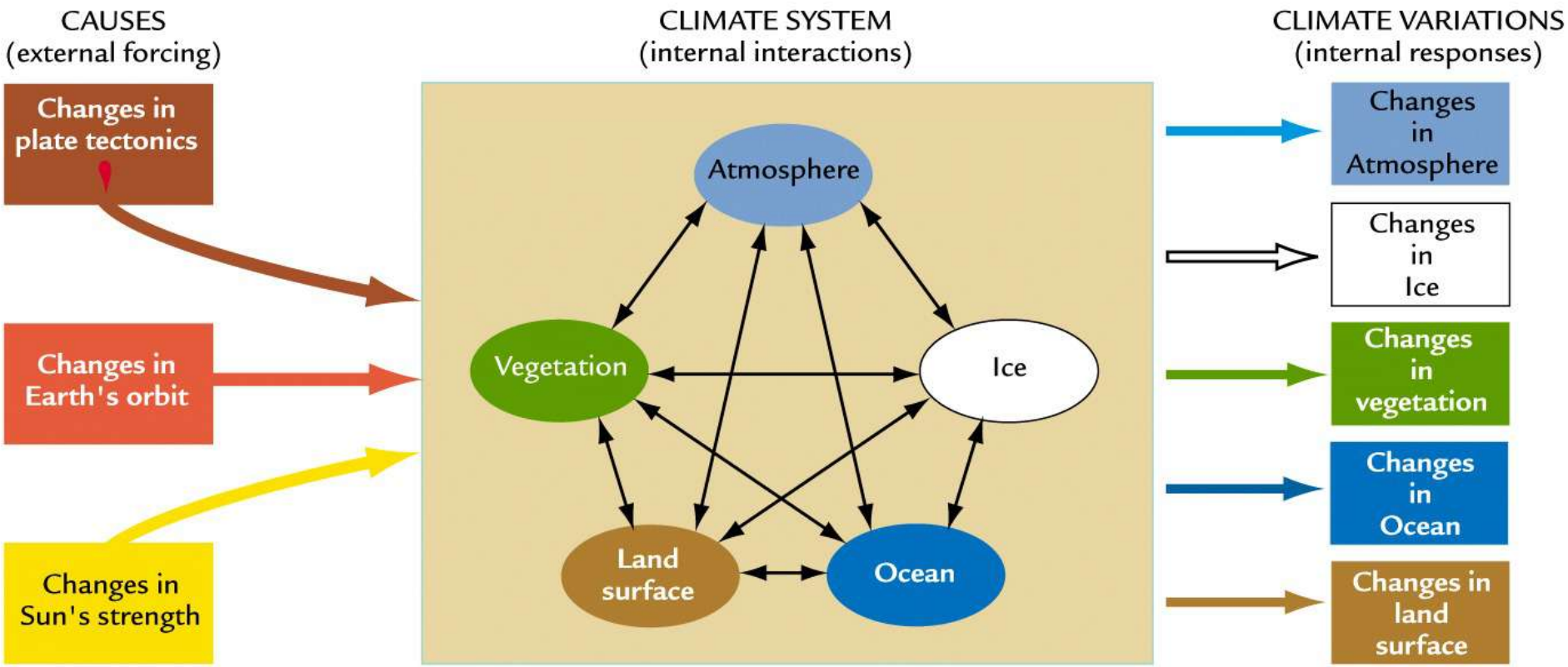
E' un sistema molto complesso nel quale interagiscono atmosfera, idrosfera (oceani), criosfera, biosfera, terra solida

sono attivi molti e diversi processi chimici, fisici, geologici e biologici….

MA E' UN SISTEMA CHE CONOSCIAMO POCO……...

Gli scienziati organizzano e semplificano la complessità del sistema climatico distinguendo:

1. fattori esterni di "*forcing*", che causano interazioni fra le componenti interne al sistema climatico (con *feedbacks* positivi e negativi)
2. "risposte" (*internal responses*), che riconosciamo come cambiamenti del clima (variabilità climatica).

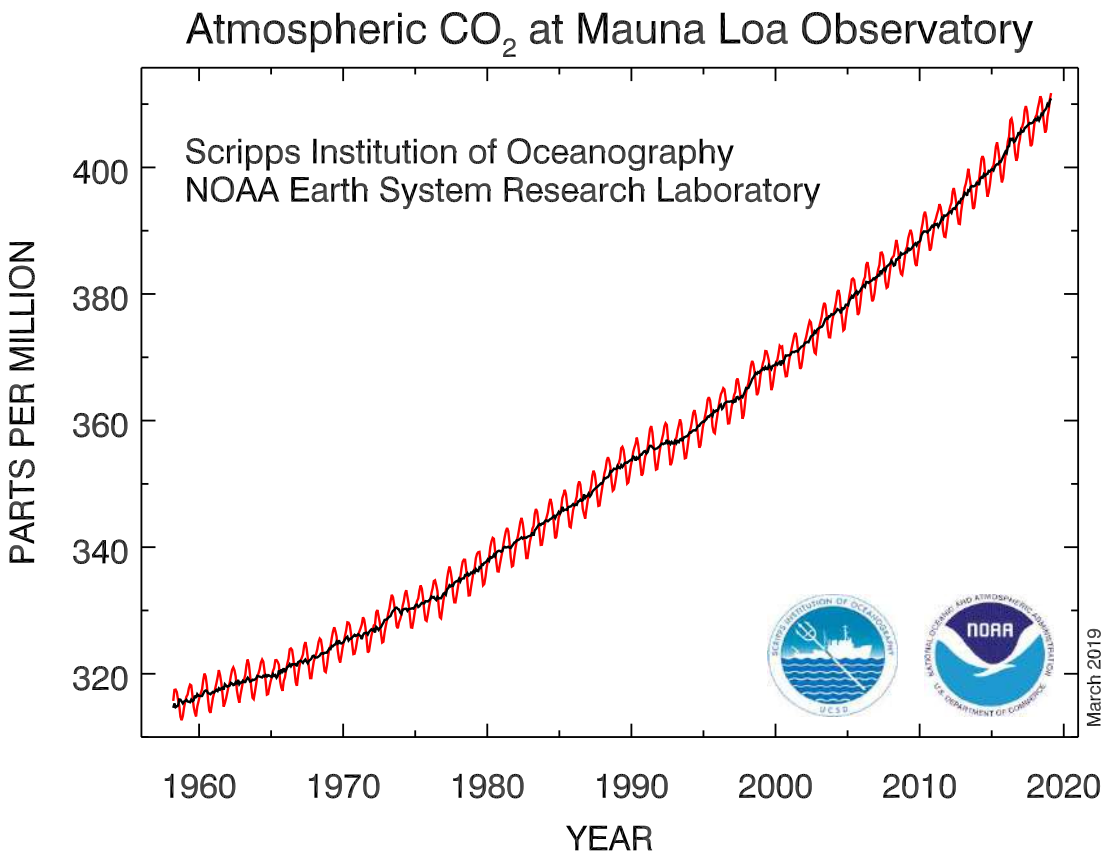


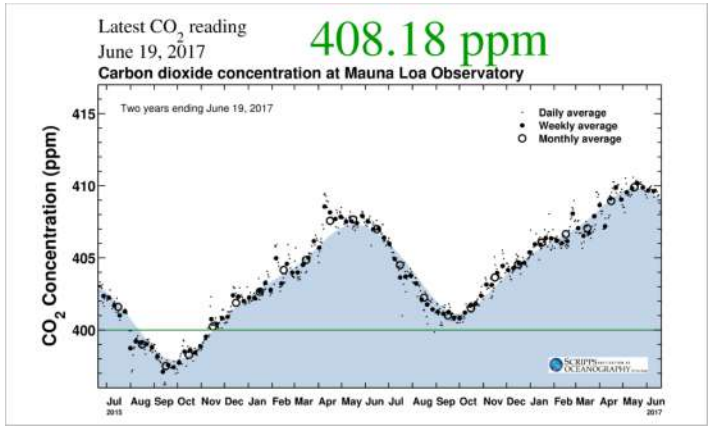
Un esempio di attualità nella complessità dei cambiamenti climatici:

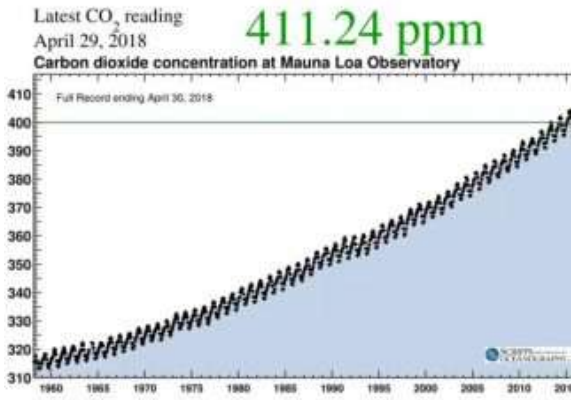
L'aumento del «gas-serra per eccellenza», la CO_2

La curva cresce in modo esponenziale: raddoppia ogni 30-35 anni

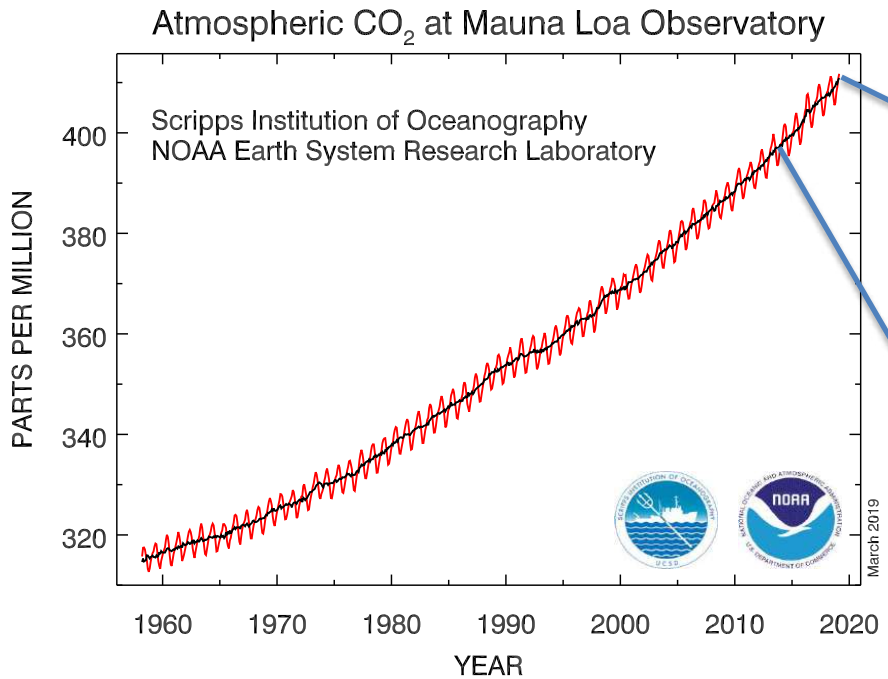
CURVA DI KEELING

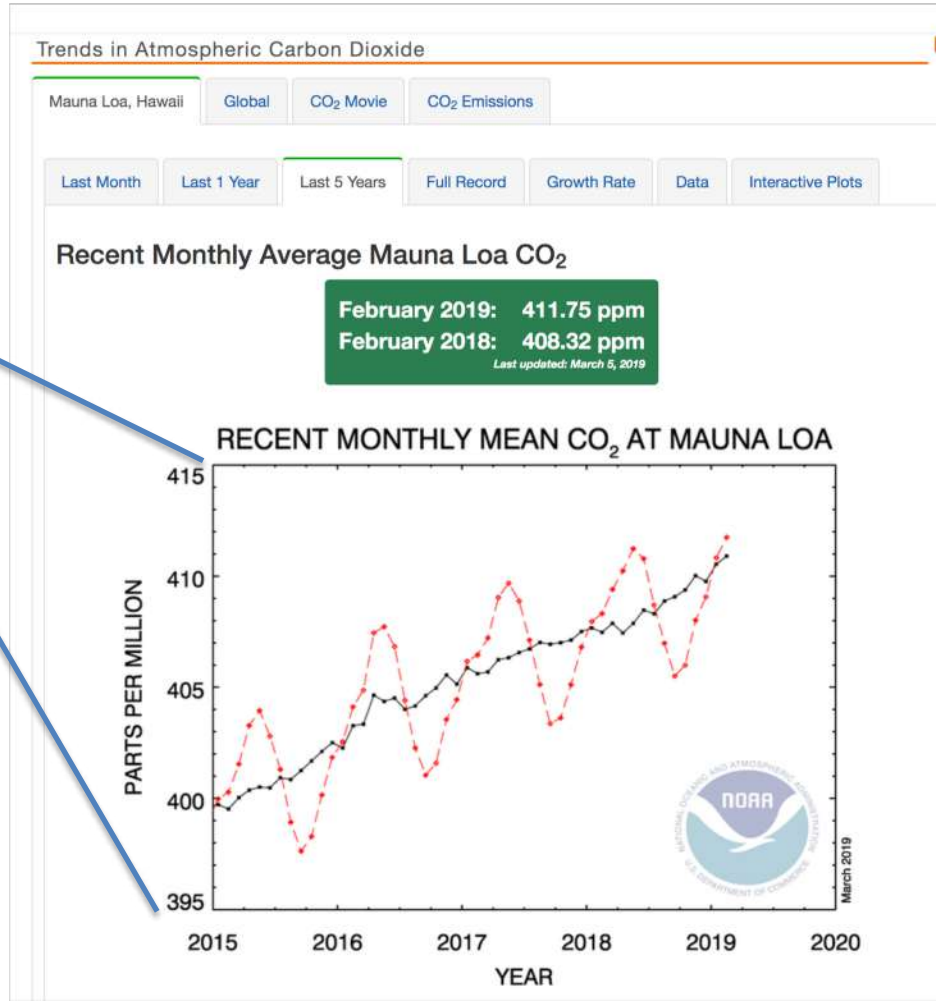






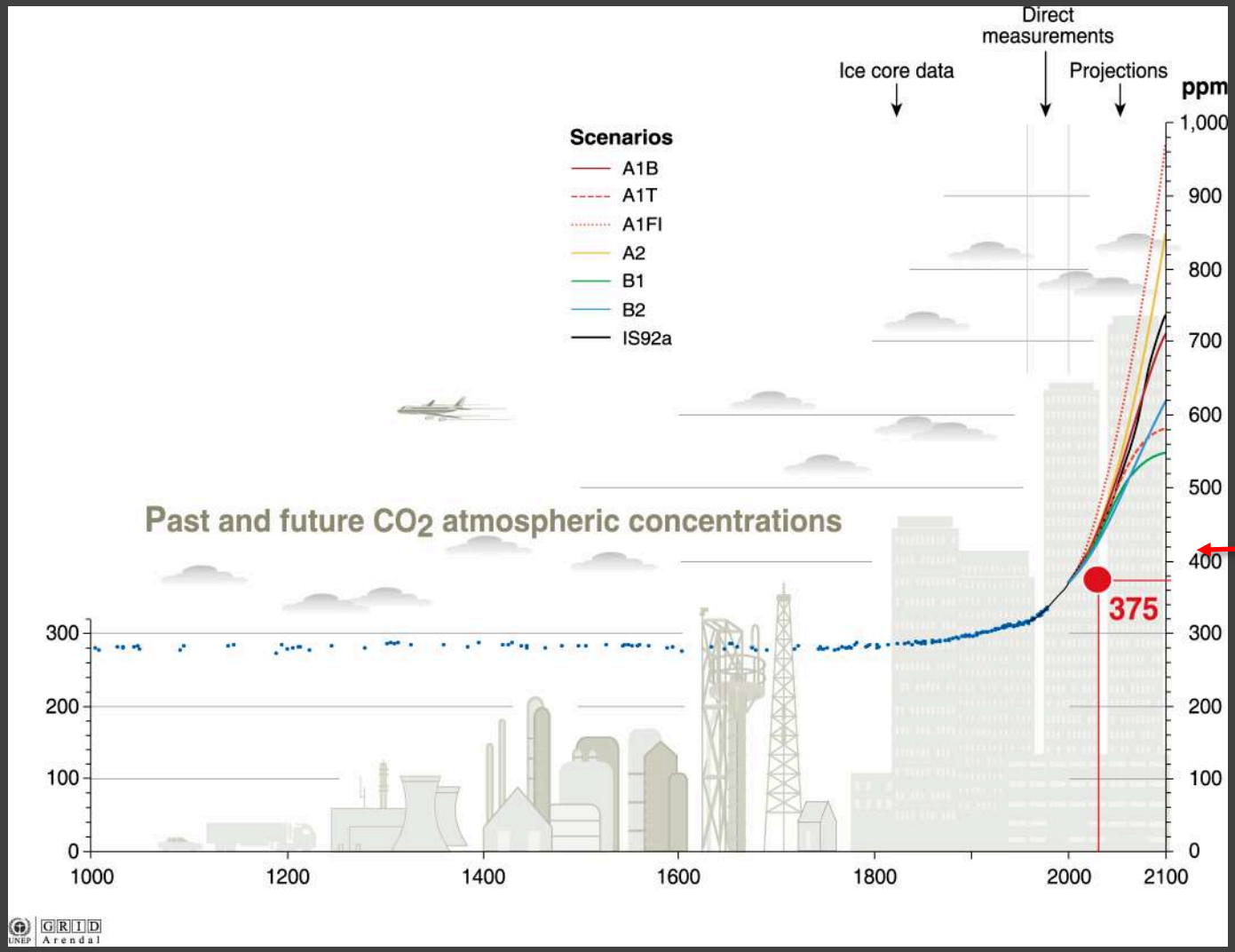
La curva cresce in modo esponenziale: la CO_2 raddoppia ogni 30-35 anni





Concentrazioni di CO_2 in atmosfera nel passato recente e nel futuro

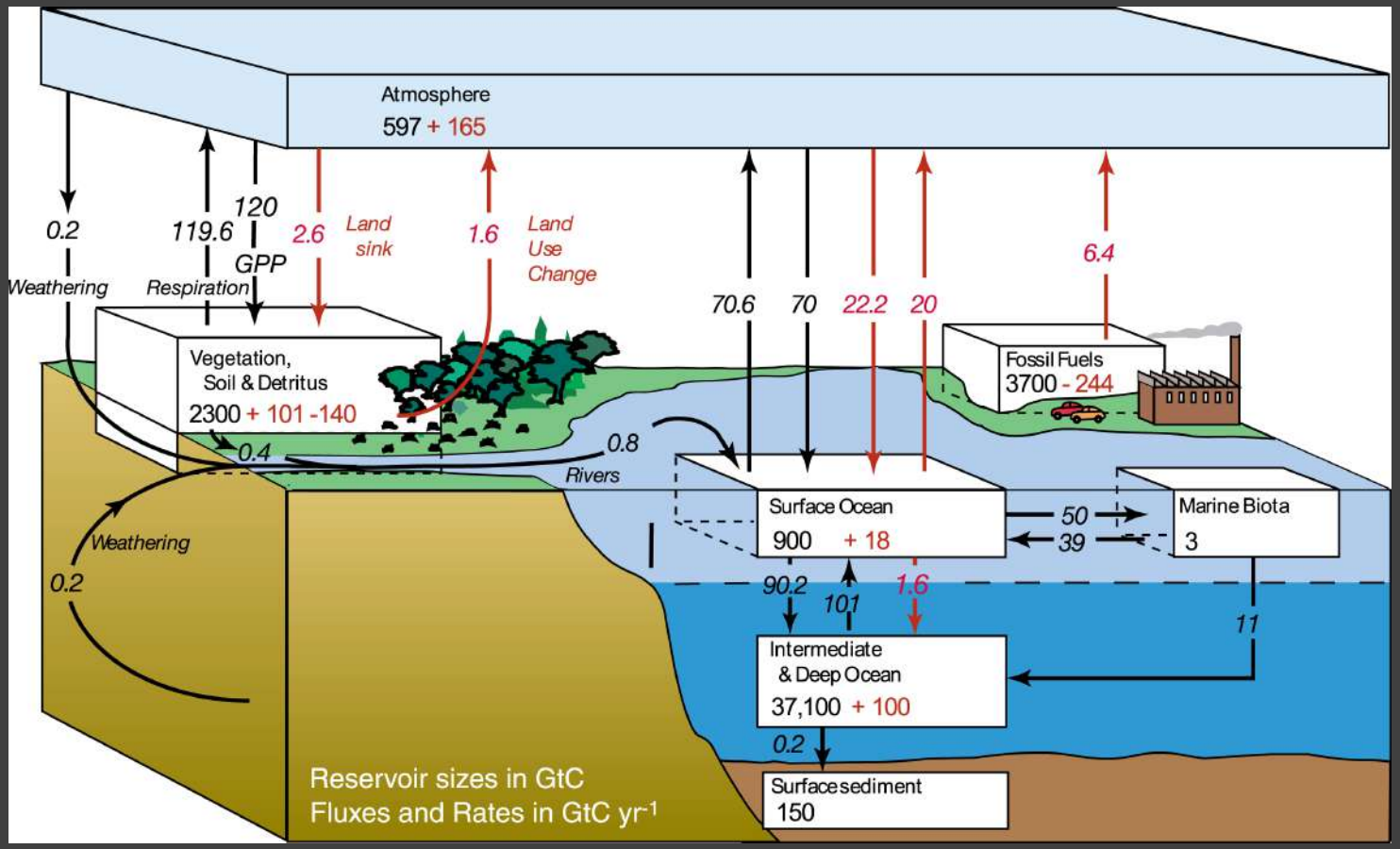
Il valore > 410ppm è il più alto negli ultimi 650 mila anni



> 410 ppm

Il ciclo del carbonio

Il carbonio è presente nella biosfera, nell'atmosfera, negli OCEANI e nella GEOSFERA

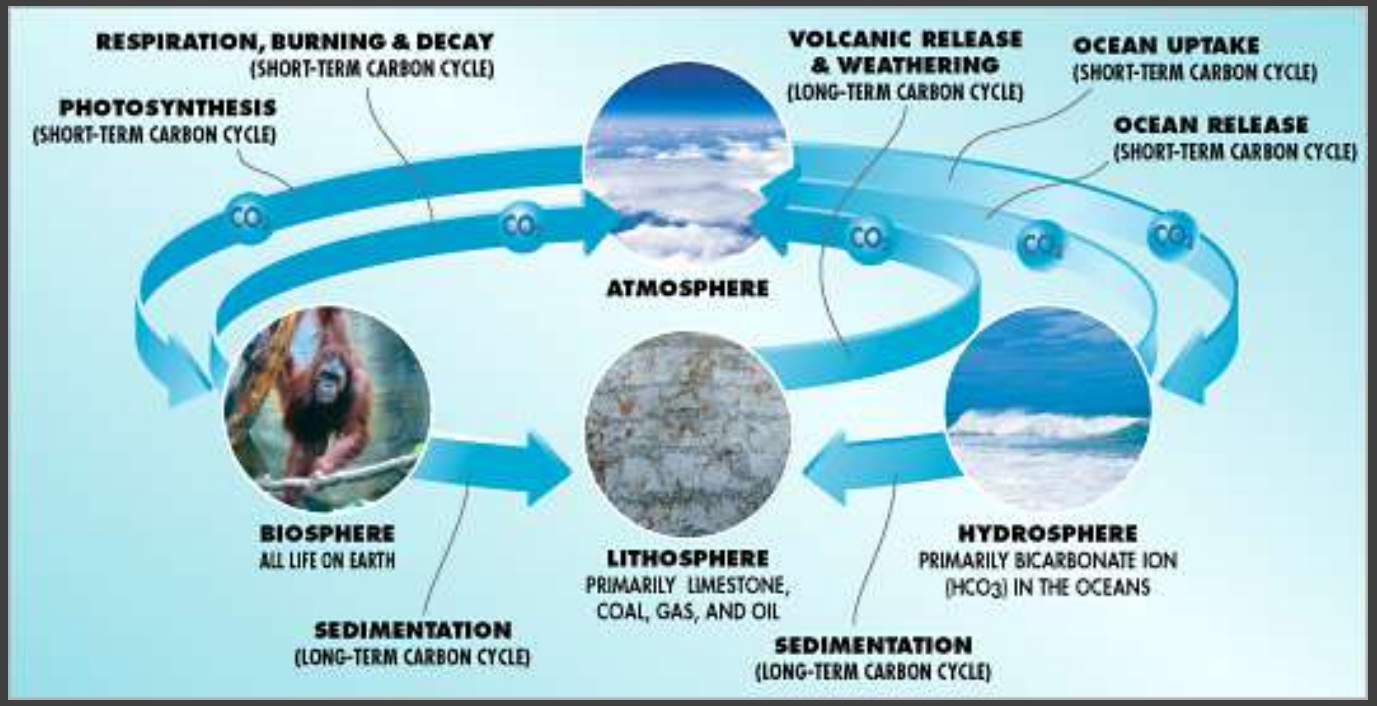


(da IPCC AR4WG1 – Fig. 7.3)

Gli OCEANI contengono circa <u>38 Gt</u> di carbonio, e assorbono CO_2 ~ 50 volte più dell'atmosfera e 20 volte più della biosfera terrestre e dei suoli.

IL CICLO DEL CARBONIO DELLA TERRA

Il C viene scambiato continuamente entro il “sistema Terra”

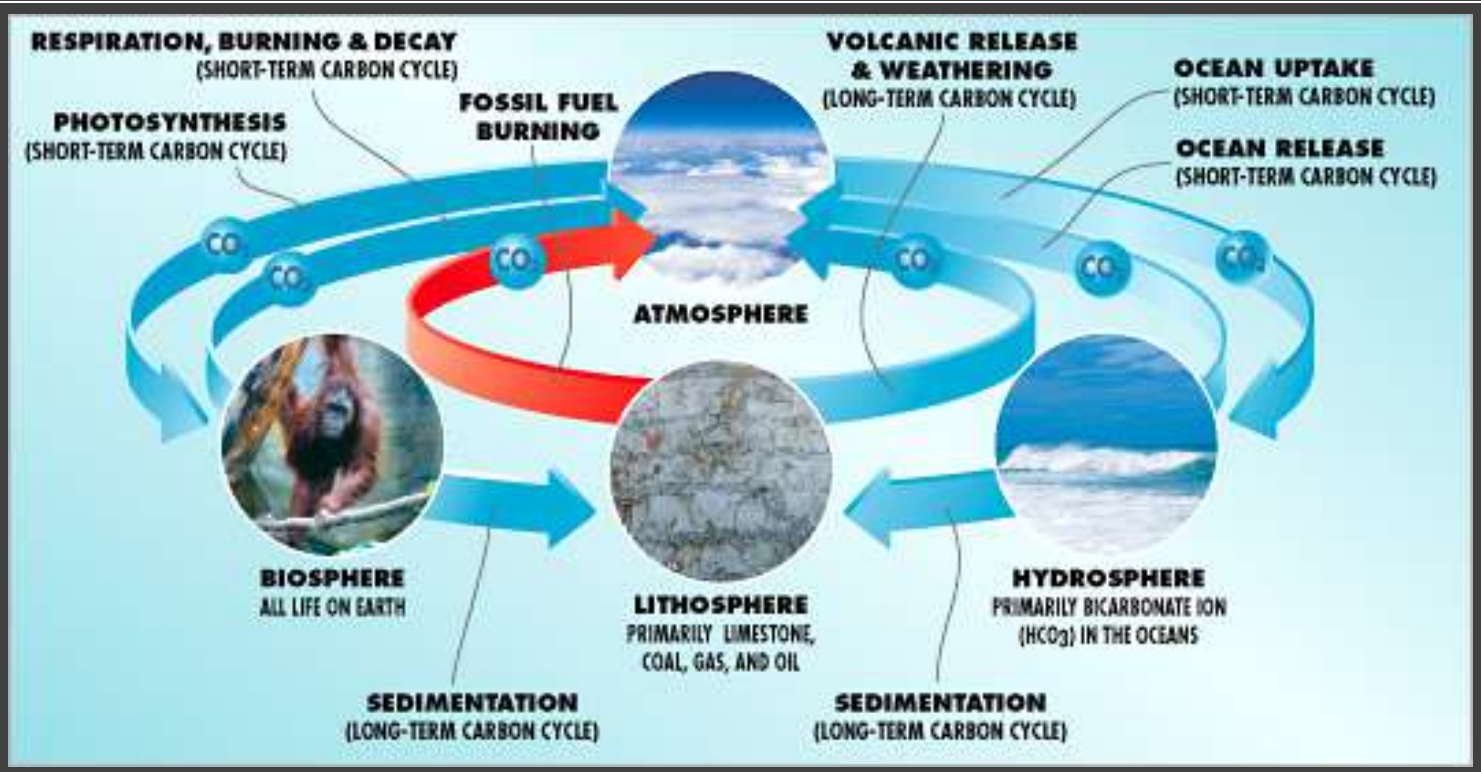


Si noti che il *C* viene scambiato sotto forma di CO_2

Perciò il ciclo del carbonio e’ importante per il clima

Gli scambi avvengono con velocità diverse: sono “*rapidi*” nella fotosintesi, nella respirazione e negli scambi oceani-atmosfera; sono “*lentissimi*” quelli coinvolti nel ciclo geologico (CO_2 che si combina con l’acqua e la rende acida e scioglie le rocce producendo C che verrà portato negli oceani dove «formerà» organismi - come coralli e plancton calcareo – e materia organica che entreranno nei sedimenti; questi potranno essere subdotti nelle profondità della Terra ed il carbonio potrà rientrare nell’atmosfera nelle manifestazioni vulcaniche)

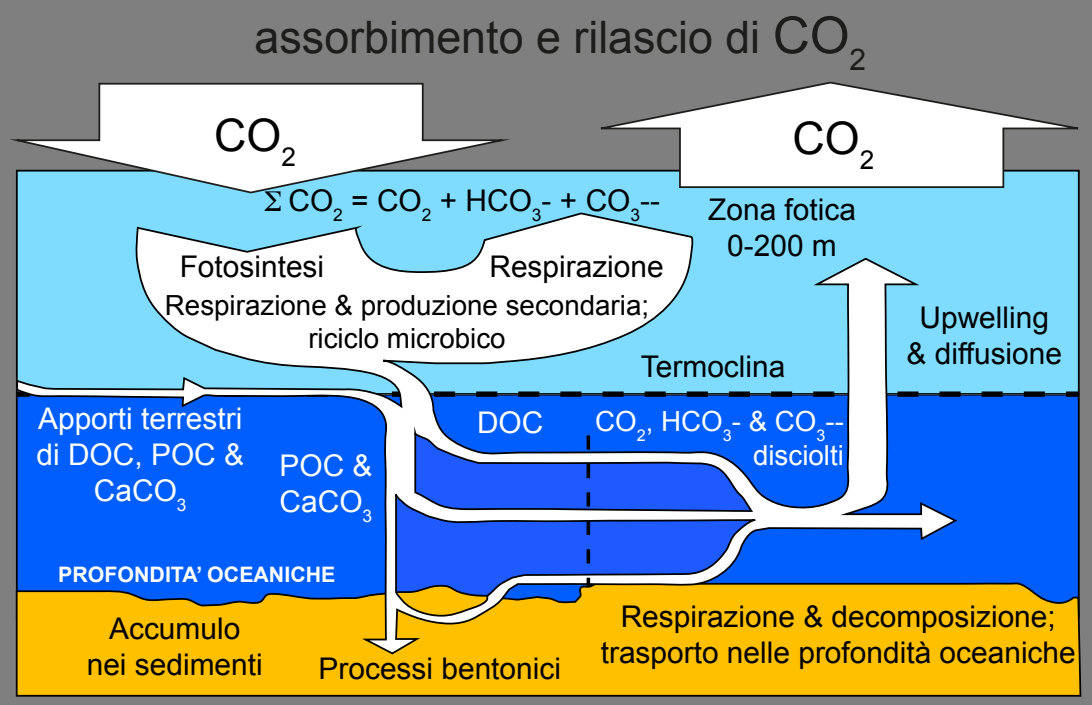
IMPATTO ANTROPICO SUL CICLO DEL CARBONIO



La freccia rossa, che rappresenta la CO_2 prodotta dai combustibili fossili, indica il modo in cui gli umani principalmente incidono sul ciclo naturale del C. I livelli di CO_2 stanno aumentando poiché il sistema naturale non “tiene il passo” con questa nuova costante fonte di emissione. I processi naturali che agiscono per la rimozione del carbonio aggiunto (assorbimento da parte degli oceani e sedimentazione) lavorano lentamente

La ridistribuzione tra atmosfera, oceani e biosfera della CO_2 in aggiunta impiega centinaia di anni, e la rimozione del carbonio in aggiunta dal ciclo a “breve termine” da parte del ciclo a “lungo termine” impiega migliaia di anni

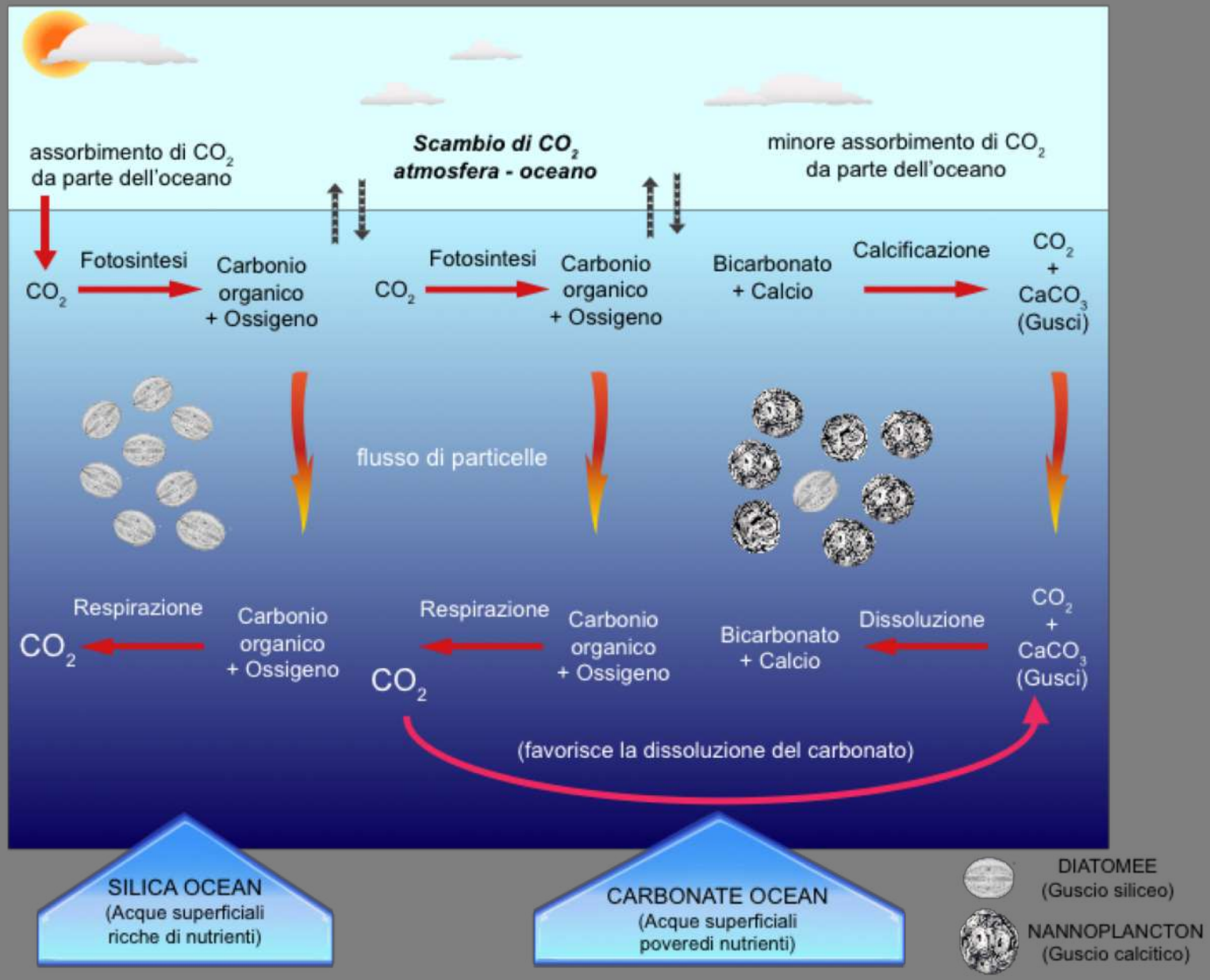
Le relative proporzioni delle componenti: **CO_2** disciolta, **HCO_3^-** e **CO_3^{2-}** riflettono il **pH** delle acque



La formazione di strutture (gusci, scheletri) di carbonato di calcio nelle acque superficiali ne modificano l'alcalinità

Cambiamenti ambientali collegati alla CO_2 influenzano la produttività e distribuzione del plancton calcareo

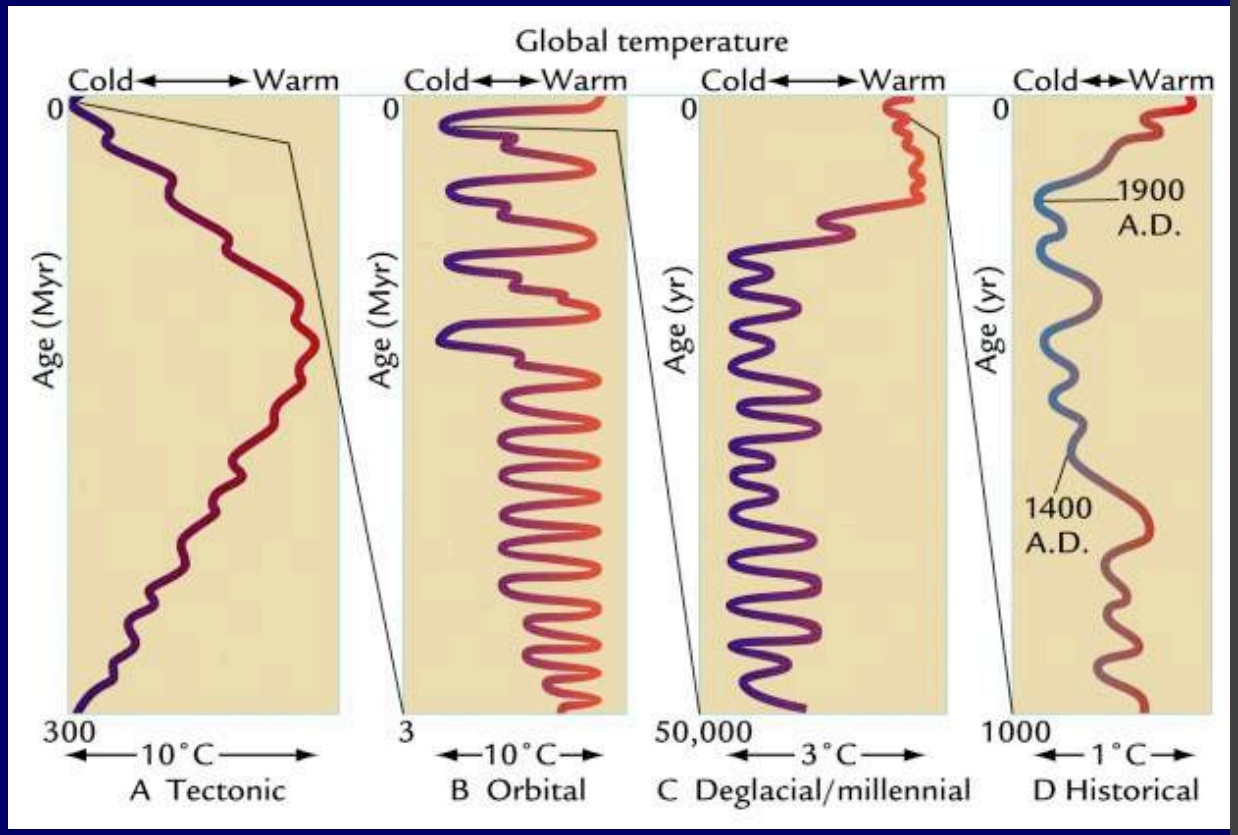
Fitoplancton e "*biological carbon pump*" - parte del ciclo globale del C



PALEOCEANOGRAFIA e PALEOCLIMATOLOGIA

Studiare gli oceani del passato geologico poiché negli oceani sono “archiviati” dati e informazioni sulla storia geologica e climatica del pianeta Terra.

LA VARIABILITA' CLIMATICA: TEMPO E MODO



Da W. Ruddiman:http://www.whfreeman.com/ruddiman/

Il clima è cambiato su diverse scale temporali con modalità distinte.

Questi cambiamenti sono compresi l'uno entro l'altro come il tempo meteorologico di un certo momento della giornata è compreso dentro una certa stagione.

- alla scala geologica (milioni di anni, lentamente),
- alla scala orbitale (decine di migliaia di anni, in modo relativamente rapido),
- alla scala sub-orbitale (migliaia di anni, talora in modo rapido, improvviso e intenso),
- alla scala storica (relativamente lenta e moderata)

Alla scala storica: LA PICCOLA ERA GLACIALE

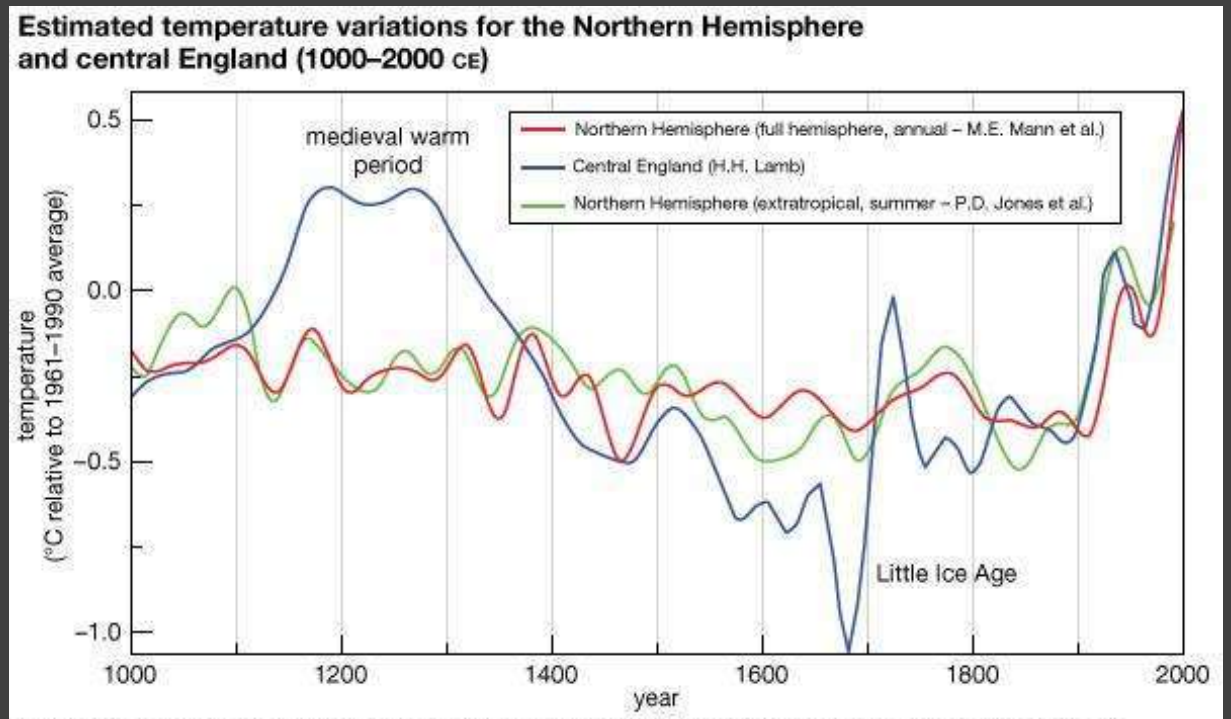
Durante la PEG fra il ‘600 e l’’800 è stato calcolata una diminuzione globale della T di ca. 0,6C.

Pieter Bruegel, the Elder: *Winter Landscape with a Bird Trap,* 1565

Alla scala storica: LA PICCOLA ERA GLACIALE

Durante la Piccola Era Glagiale, fra il '600 e l' 800, è stato calcolato una diminuzione globale della T di ca. 0,6C.

Durante l'ultimo massimo glaciale (21 Ka) la T globale era di 5 - 7° C inferiore all'attuale.



Sources: M.E. Mann et al., "Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations," *Geophysical Research Letters*, 26:759–762 (1999); P.D. Jones et al., "High-resolution Palaeoclimatic Records for the Last Millennium: Interpretation, Integration, and Comparison with General Circulation Model Control Run Temperatures," *Holocene*, 8:477–483 (1998); H.H. Lamb, "The Early Medieval Warm Epoch and Its Sequel," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1:13–37 (1965).

ARCHIVI della STORIA CLIMATICA

- alla scala geologica (milioni di anni, lentamente)
- alla scala orbitale (decine di migliaia di anni, in modo relativamente rapido)
- alla scala sub-orbitale (migliaia di anni, talora in modo rapido, improvviso e intenso)

ARCHIVI della STORIA CLIMATICA

Carote di ghiaccio

Sedimenti lacustri

- carote di ghiaccio (*ice cores*)
- sedimenti di lago….etc.
- SEDIMENTI OCEANICI

LA PERFORAZIONE DEI FONDI OCEANICI

D/V Joides Resolution

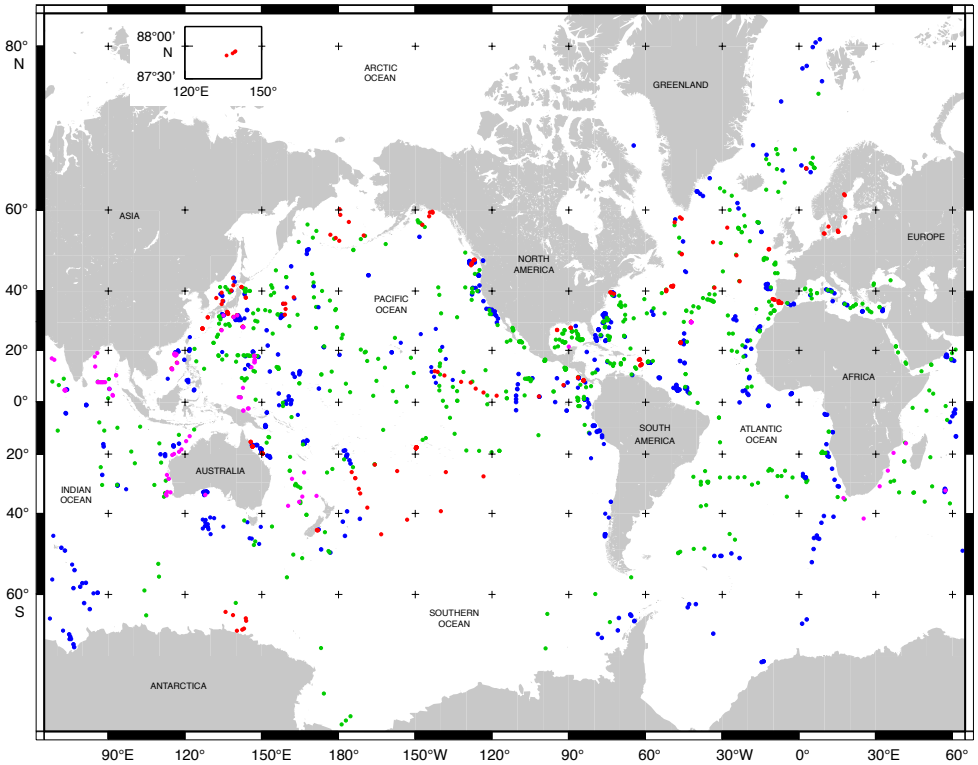
Progetti internazionali (dal 1968: DSDP, ODP, IODP) in tutti gli oceani del mondo, con km di sedimenti recuperati:

DSDP - 97.056 m

ODP - 222.704 m

IODP -101.755 m

Un archivio prezioso della storia della Terra (Vita, Dinamica e Clima).



DSDP Legs 1–96 (●), ODP Legs 100–210 (●), IODP Expeditions 301–348 (●), IODP Expeditions 349–371 (●)

Gli “ARCHIVI SEDIMENTARI”

Carote !!
Cores !!

ODP Legs 138, 154, 172, 199, 208, IODP Expedition 321 negli oceani Pacifico e Atlantico

IODP Exp. 321 – 2009, Pacific

ODP Leg 199 – 2001, Pacific

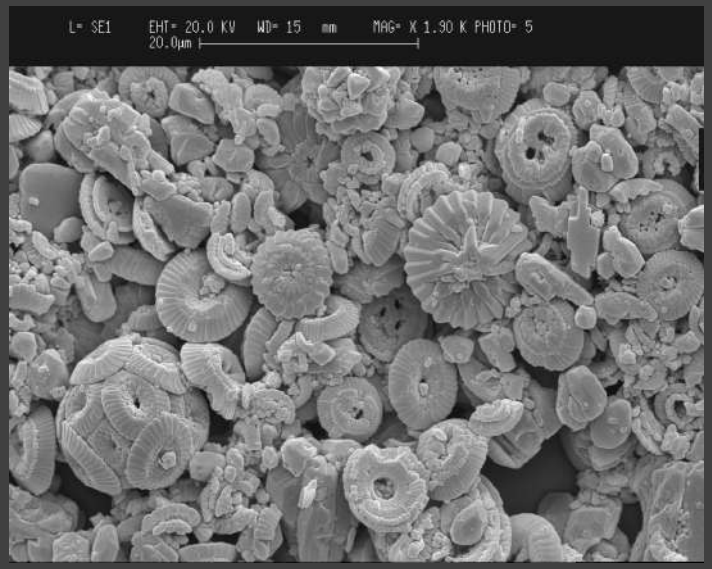
IODP Exp. 321 –2009, Pacific

ODP Leg 208 – 2003, Atlantic

IODP Exp. 321 –2009, Pacific

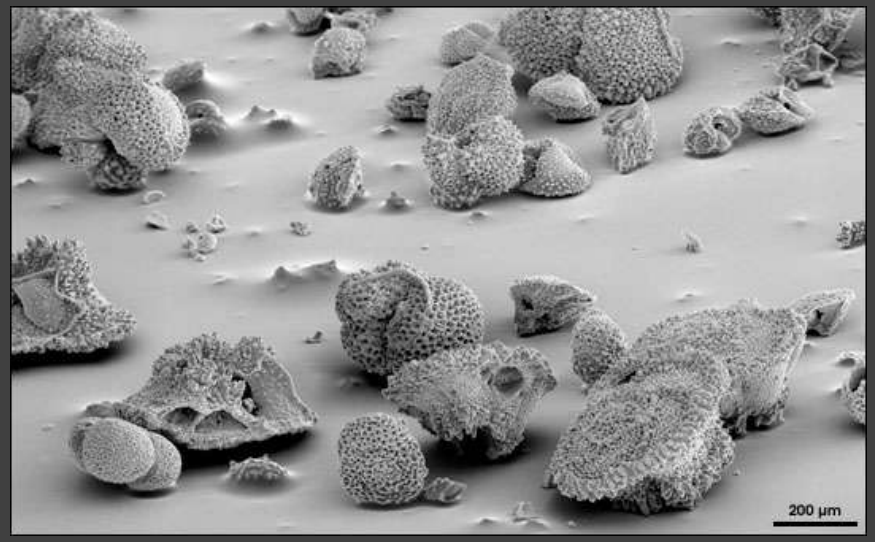
UN ARCHIVIO: I SEDIMENTI OCEANICI BIOGENICI

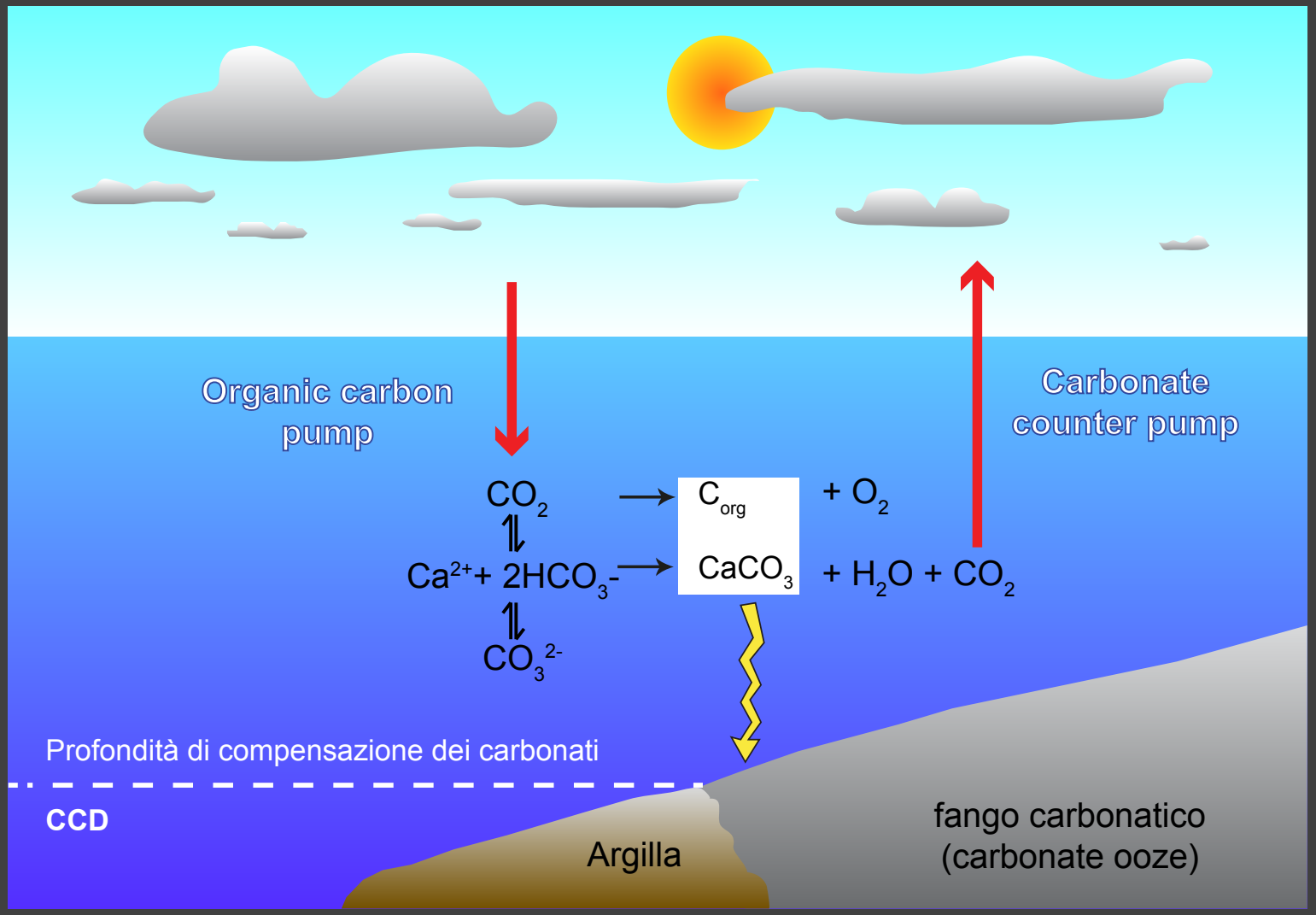
dal plancton calcareo – $CaCO_3$



Nannoplancton calcareo (0,003-0,015 mm)

Foraminiferi (0,01-0,4 mm)





Il sistema della "biological carbon pump", che è parte del ciclo globale del carbonio, fa sì che il 90% della CO_2 introdotta nell'atmosfera venga rimossa e depositata nei sedimenti marini attraverso questi micro-organismi.

I **sedimenti marini profondi** forniscono materiale unico (archivi sedimentari) per studiare la storia paleoceanografica e climatica della Terra:

“REGISTRANO” LA STORIA DEL CLIMA PER GLI ULTIMI 150 Ma

Sono quindi la chiave per capire i climi del passato, la loro variabilità temporale, i meccanismi di trasporto di calore latitudinale, il ruolo dei gas “serra” e della circolazione oceanica, a loro volta di cruciale importanza per la possibile futura transizione verso un clima più caldo.

Le informazioni che contengono sono scritte in una sorta di “linguaggio in codice”

ARCHIVI e "LINGUAGGIO IN CODICE": i *PROXY* del CLIMA

ARCHIVI

- carote di ghiaccio (*ice cores*)
- sedimenti di lago

- SEDIMENTI OCEANICI

INDICATORI - *PROXY*

- fossili
- litologia
- .....
- ISOTOPI STABILI

(es. OSSIGENO e CARBONIO)

UN PROXY: GLI ISOTOPI STABILI DELL'OSSIGENO

^{16}O	^{17}O	^{18}O
99.76	0.04%	0.20%

$CaCO_3$

Foraminiferi

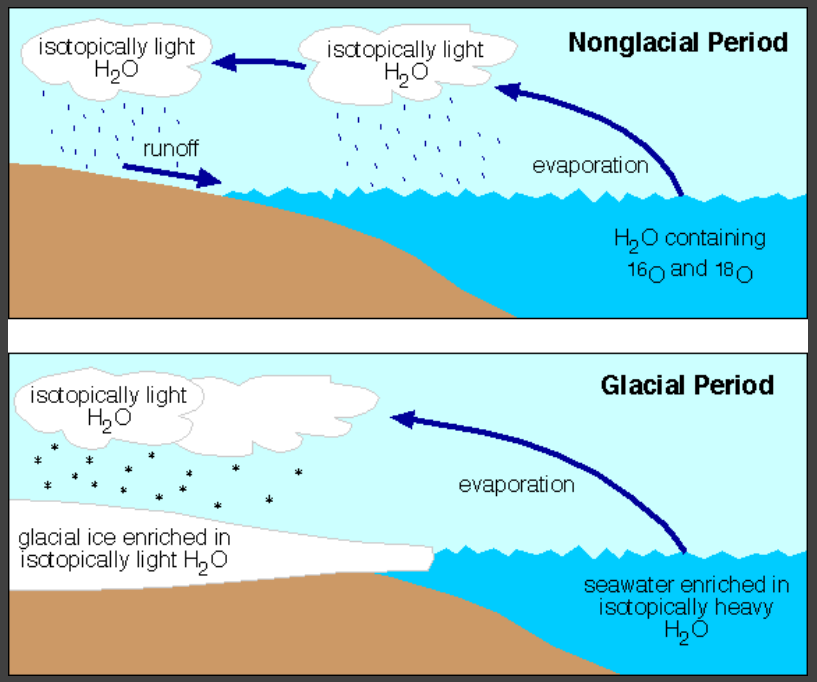
Il rapporto $^{18}O/^{16}O$ ($\delta^{18}O$) si misura con spettrometri di massa sui gusci di foraminiferi

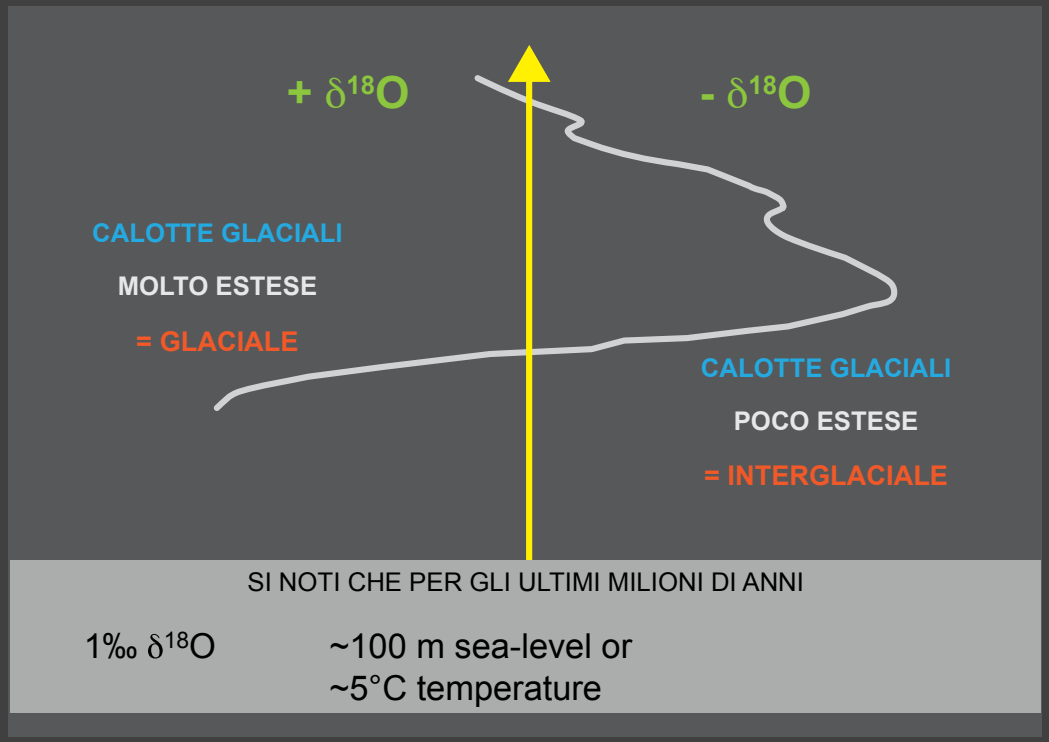
$^{18}O/^{16}O$ è, fondamentalmente, funzione di:

- temperatura dell'acqua dove è cresciuto l'organismo
- volume dei ghiacciai (calotte glaciali = livello del mare)

gli ISOTOPI STABILI dell'OSSIGENO

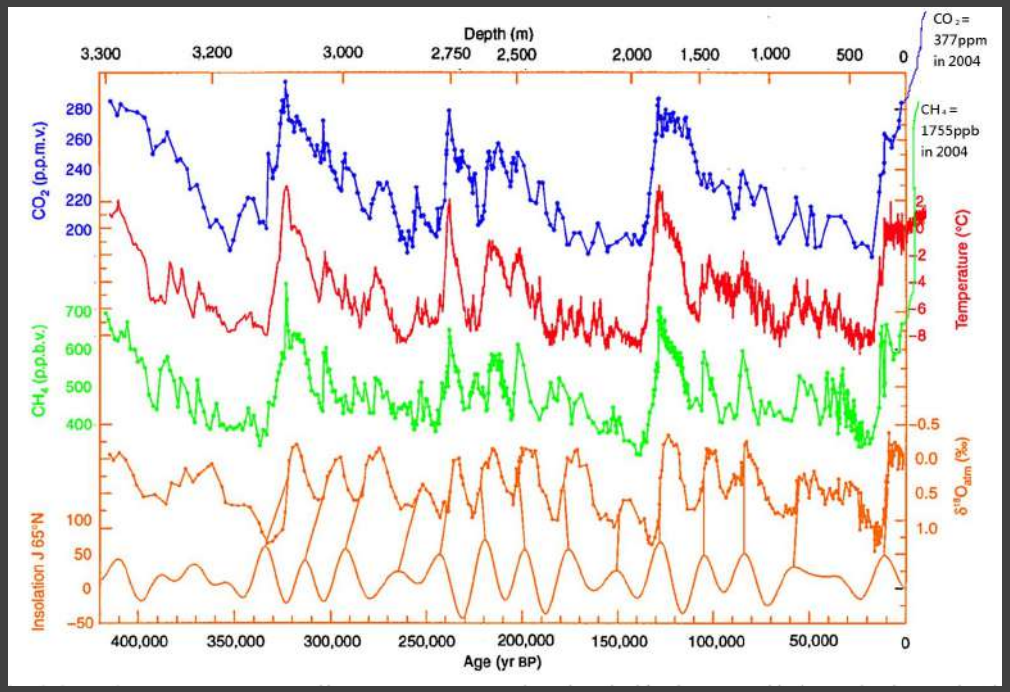
Il rapporto $^{18}O/^{16}O$ ($\delta^{18}O$)

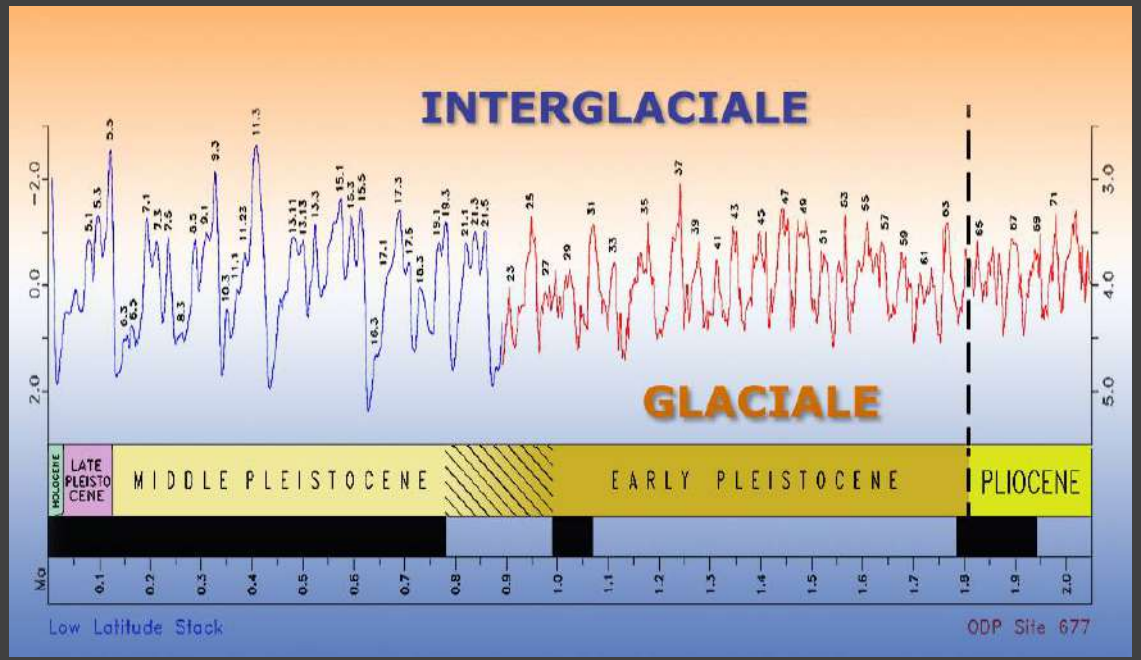




gli ISOTOPI STABILI dell'OSSIGENO

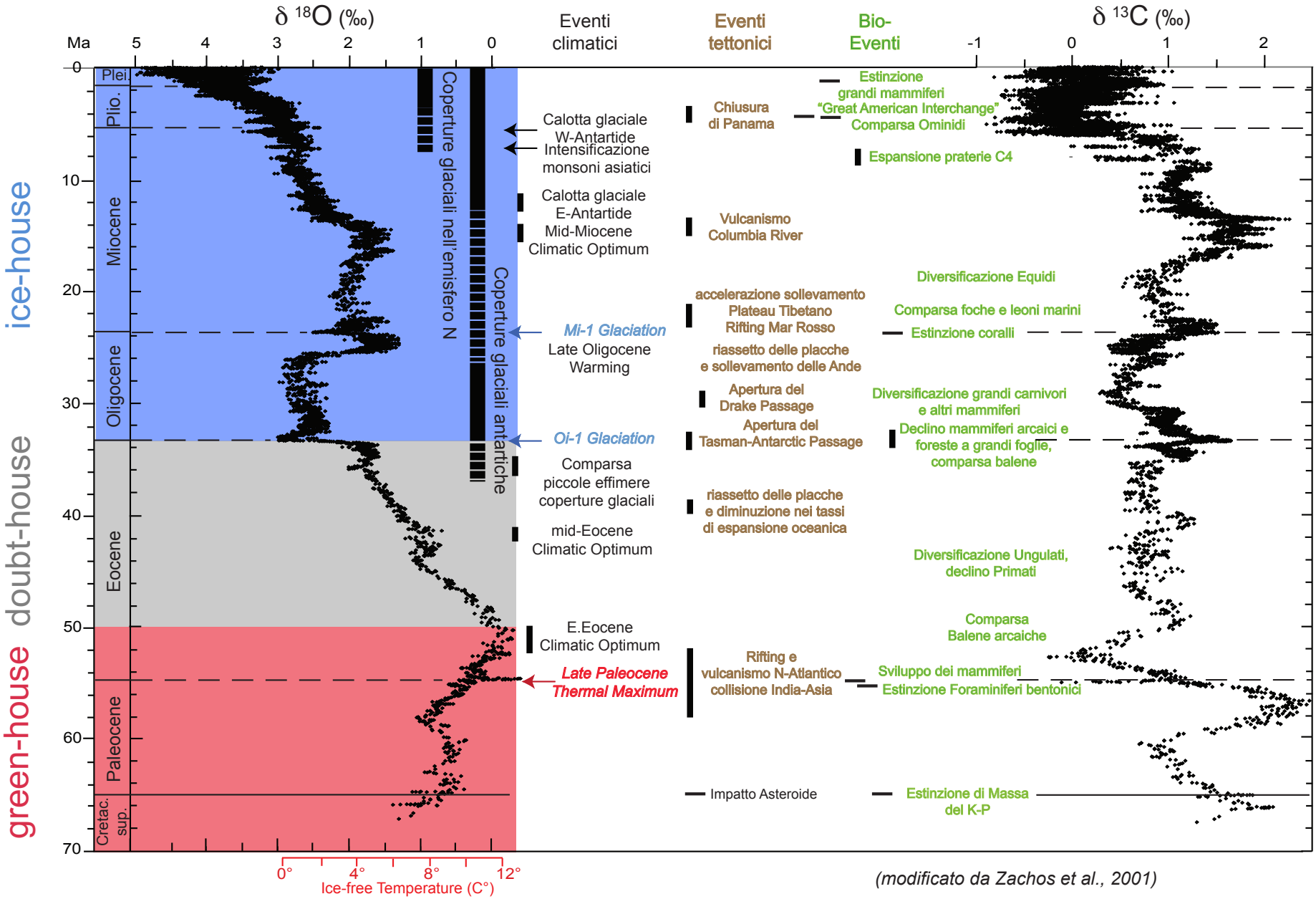
Vostok ice core



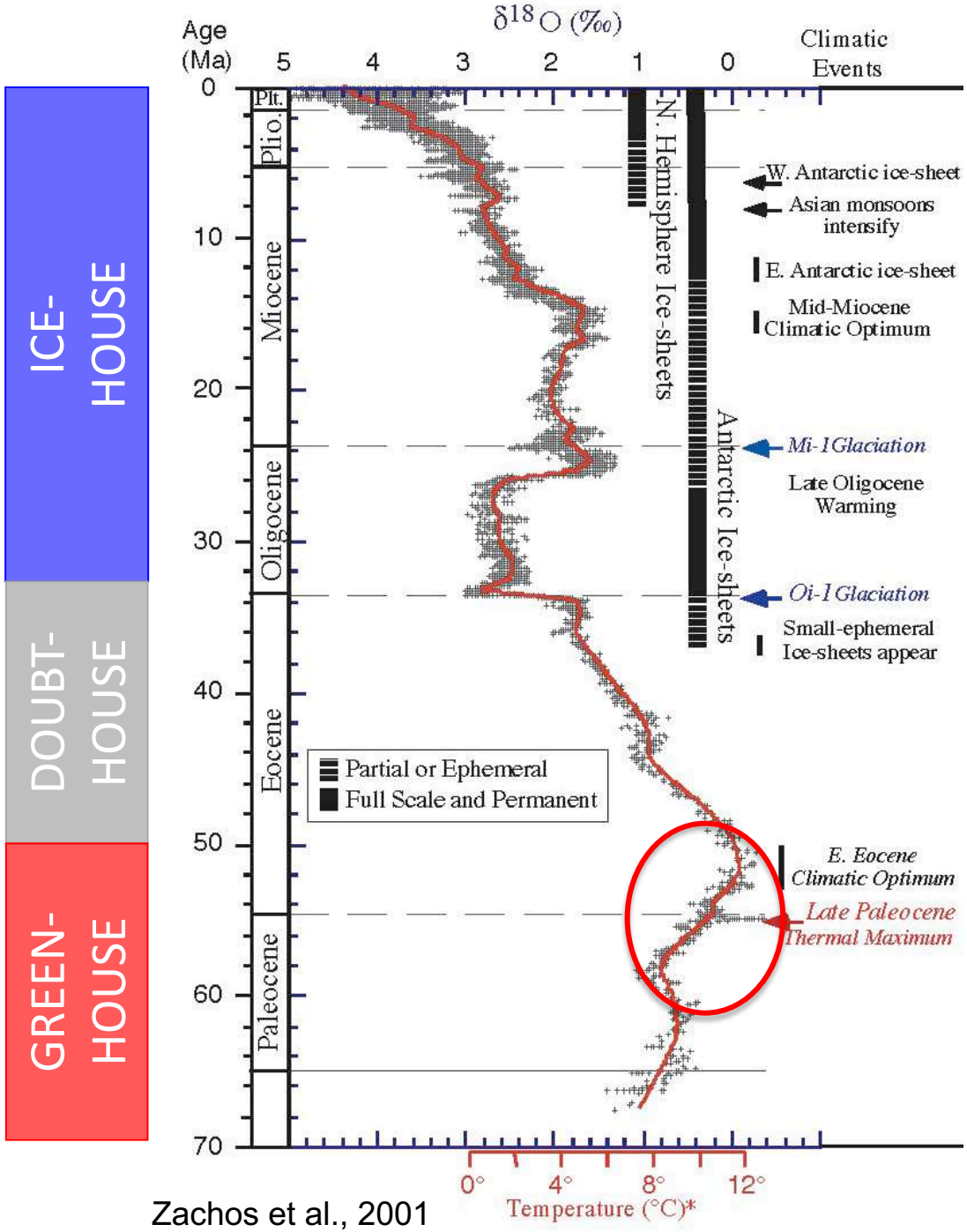


Successione sedimentaria di mare profondo (ODP Site 677)

Il clima nel Cenozoico nei *record* isotopici di O e C



(modificato da Zachos et al., 2001)



Zachos et al., 2001

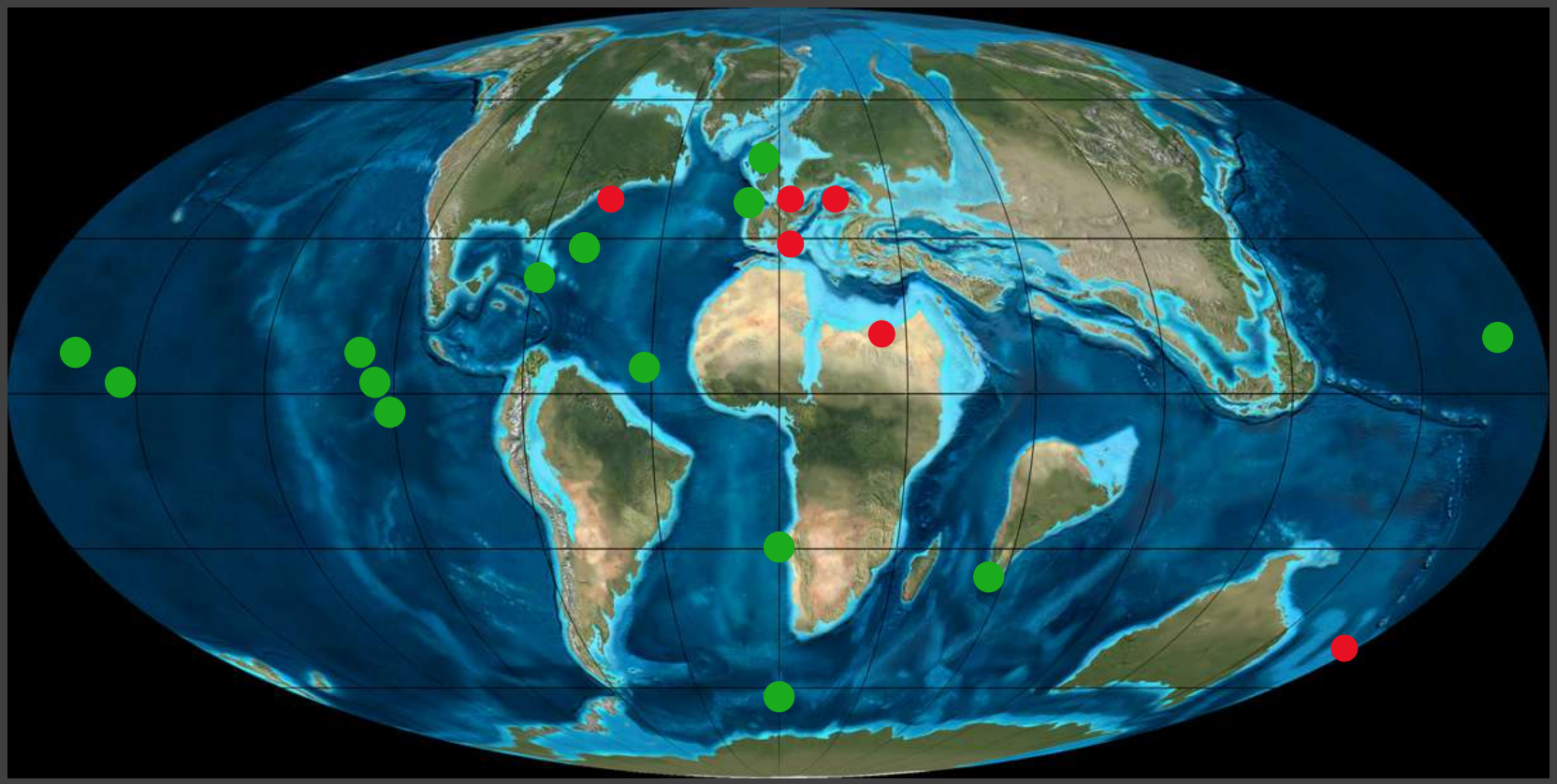
TEMPERATURA DELLE ACQUE DI FONDO DEGLI OCEANI

NEGLI ULTIMI 65 Myr

Episodi climatici con alte temperature

"Hyperthermals"

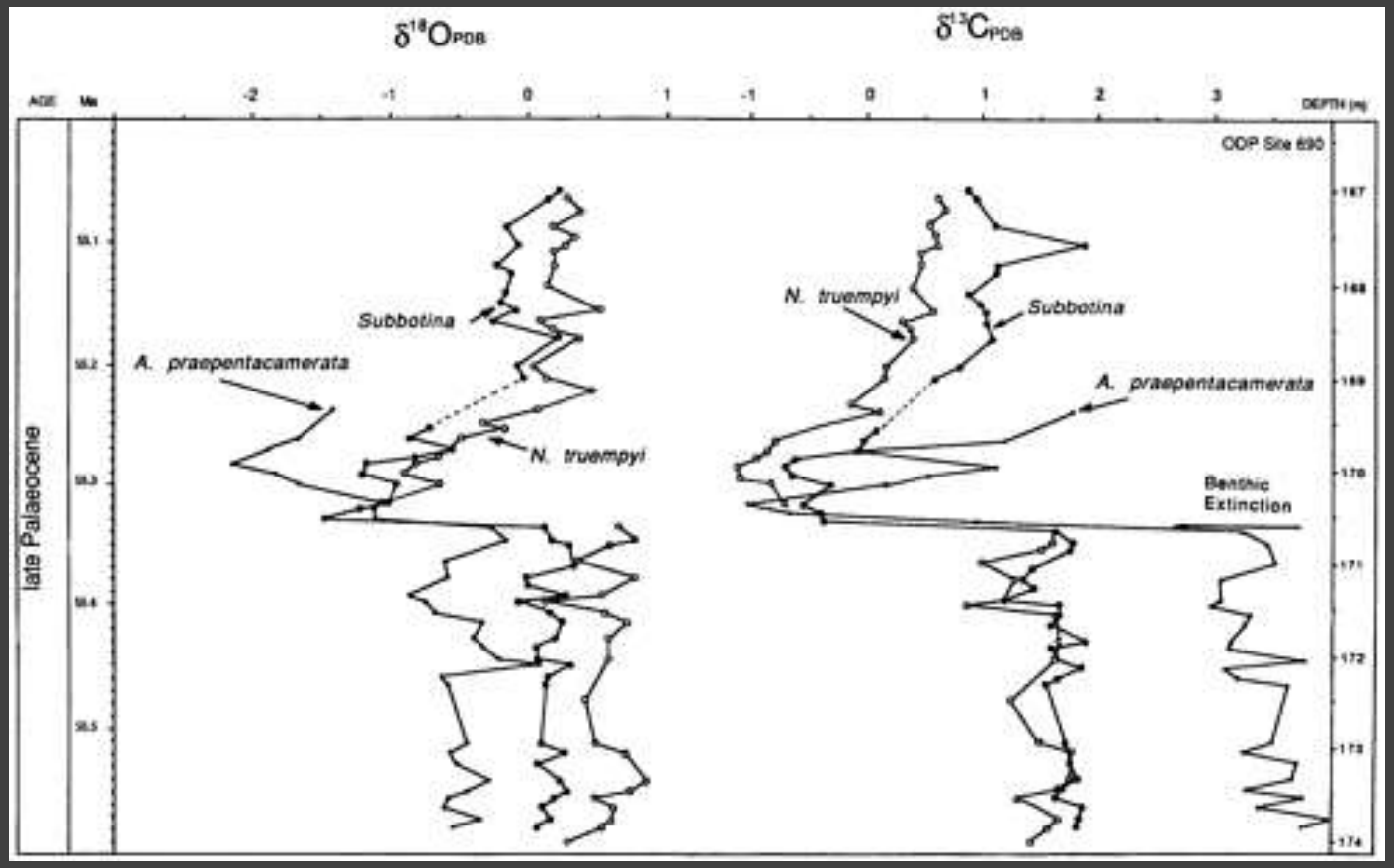
***P**aleocene-**E**ocene **T**hermal **M**aximum* (PETM)



Posizione dei Continenti a 55 Ma
Documentazioni sedimentarie del PETM

- DSDP, ODP, IODP sections
- land sections

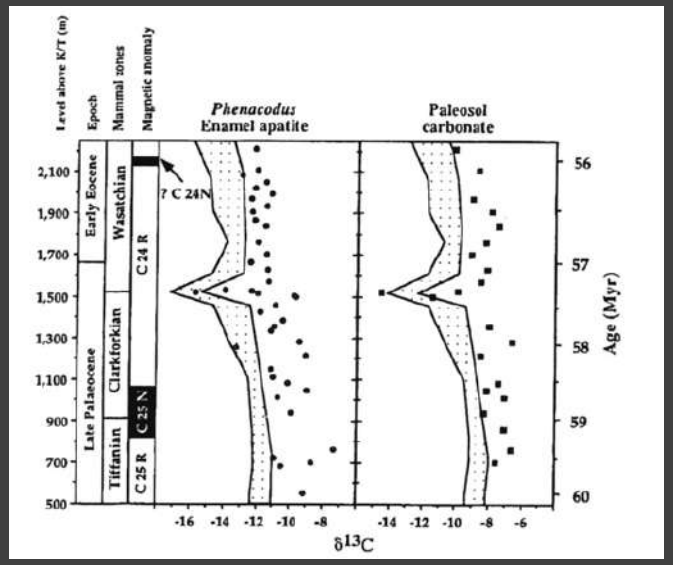
La marcata anomalia negativa degli isotopi dell'O, che indica innalzamento delle temperature, è associata a un'anomalia negativa degli isotopi del carbonio molto marcata (Kennett & Stott, 1991)



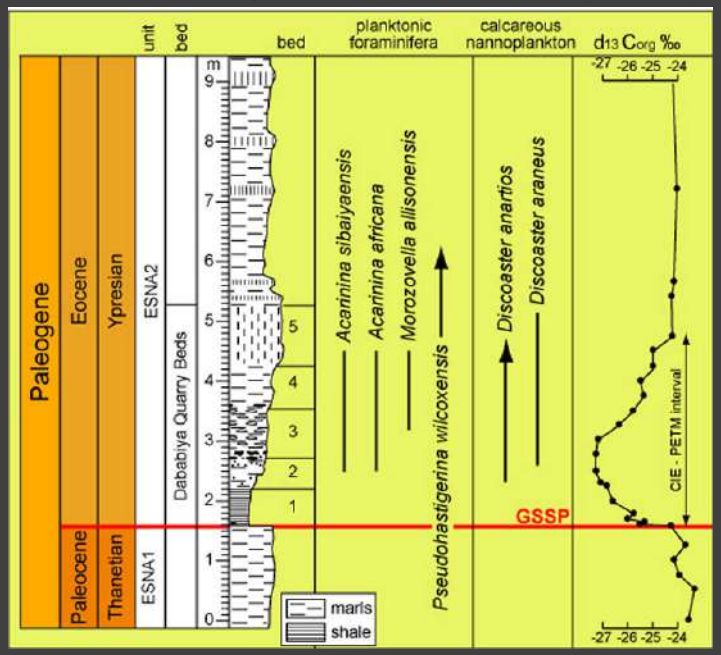
Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM)

CARBON **I**SOTOPE **E**XCURSION (CIE)

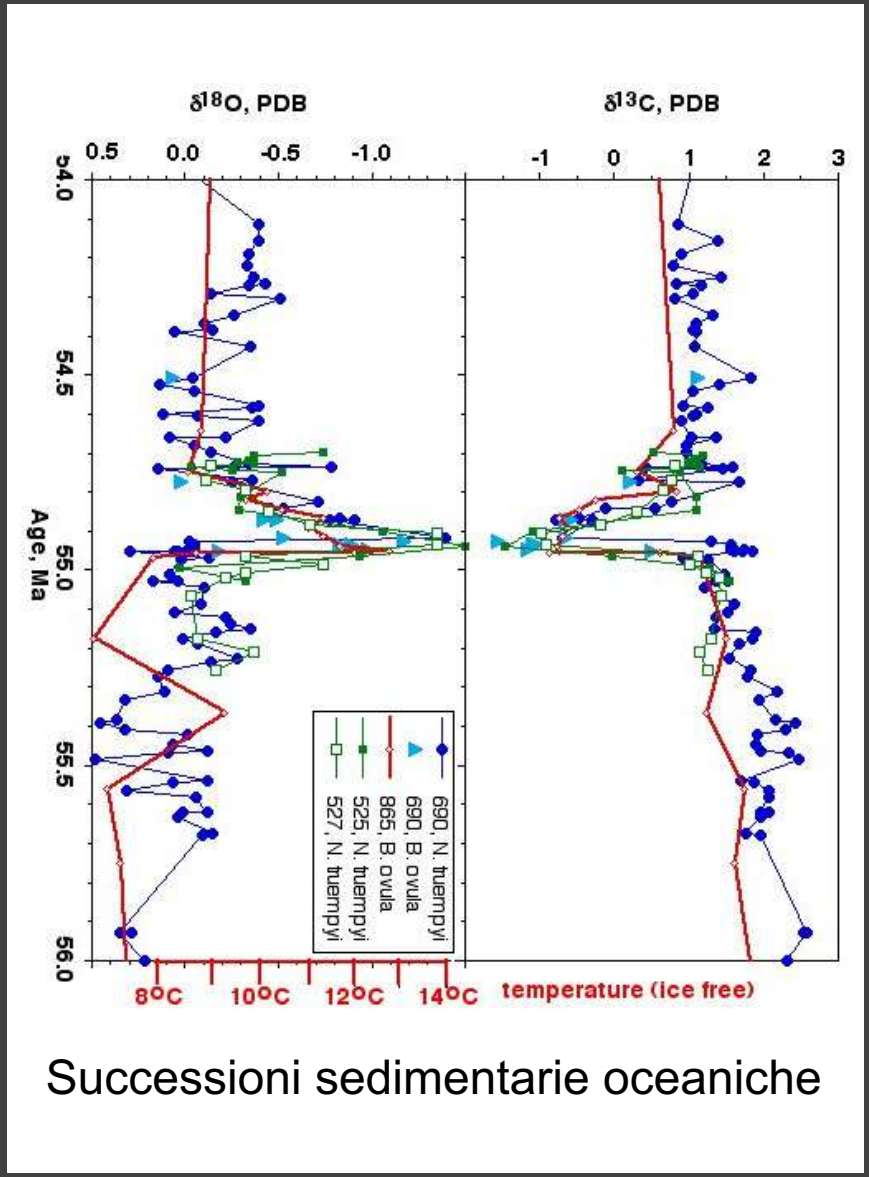
esempi di CIE - PETM



Paleosuoli (Bighorn Basin, Wyoming, USA)



Sezioni su terra (Grabal Dababiya , Luxor, Egitto)



Successioni sedimentarie oceaniche

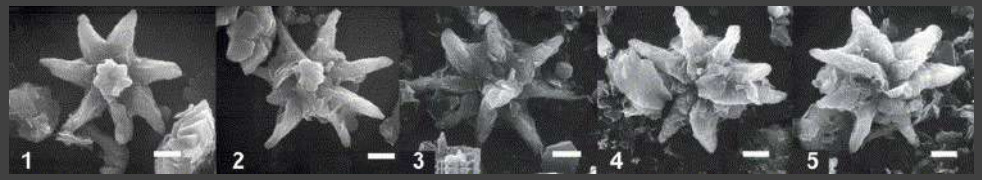
“Acidificazione” degli oceani

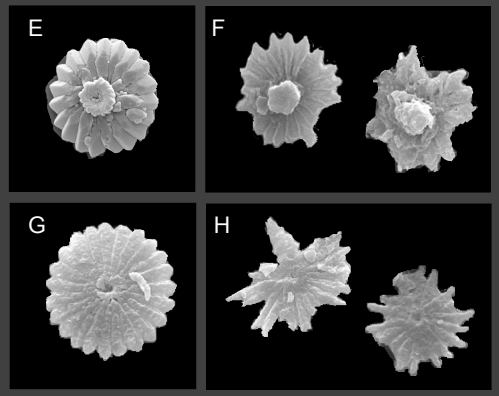
Con l’immissione nel sitema oceano-atmosfera di una enorme quantità di CO_2 il pH delle acque diminuì notevolmente

$$CO_2 + H_2O + CO_3^{2-} \longleftrightarrow 2\ HCO_3^{-}$$

Si “acidificarono” prima le acque superficiali e poi (dati itempi della circolazione oceanica) quelle di fondo

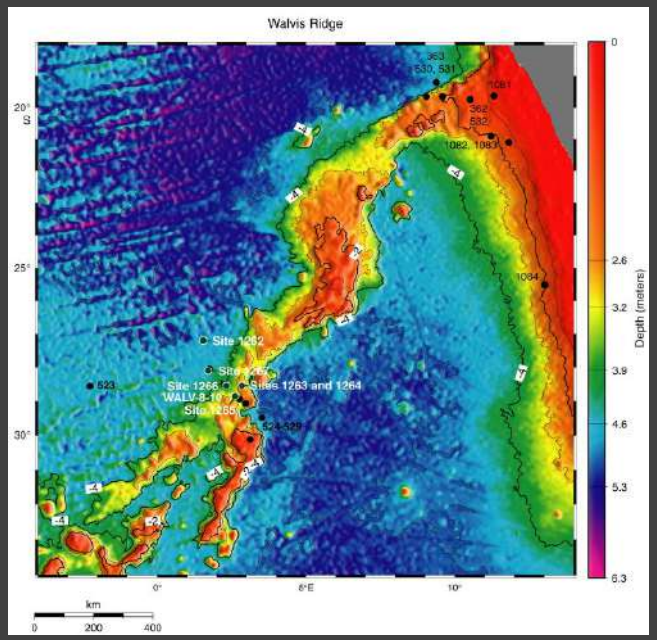
Nelle acque superficiali andarono in crisi i microrganismi organismi calcarei – Estinzioni, forme aberranti, decalcificazione





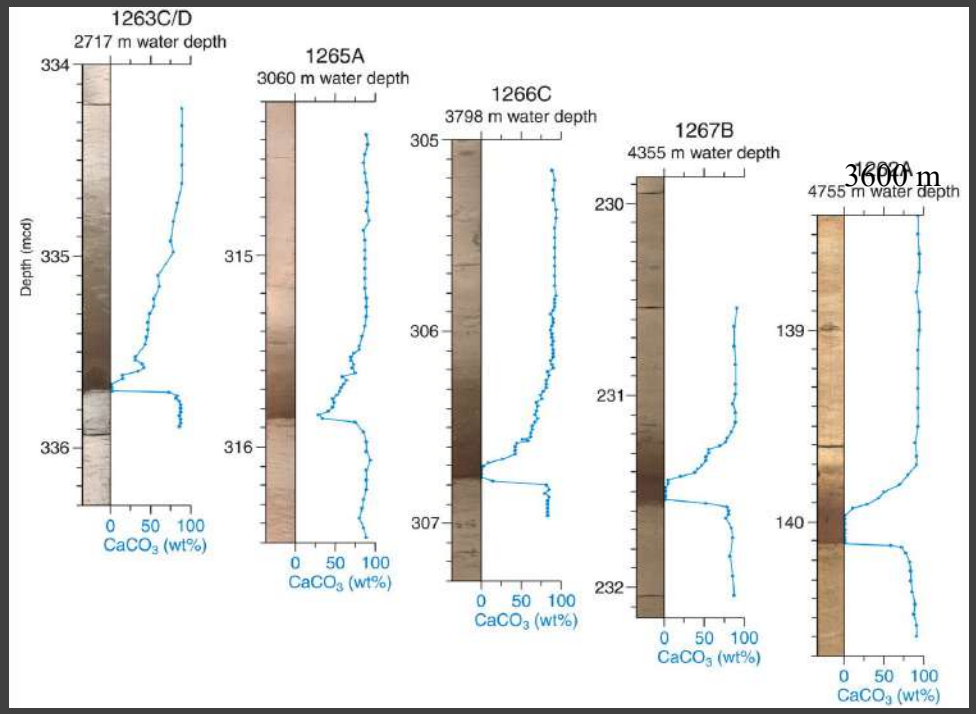
(da Raffi e De Bernardi, 2008

20 µm



E' quello che si vede nei sedimenti oceanici e anche in sezioni su terra non molto profonde: una zona di dissoluzione nella parte bassa della CIE.

(A destra i dati relativi al "transetto" del Walvis Ridge - Atlantico SE, ODP Leg 208)



(da Zachos, Röhl, Schellenberg, Sluijs, Hodell, Kelly, Thomas, Nicolo, Raffi, Lourens, McCarren, Kroon, Nature, 2005)

“FASCINO” DEL PETM

- ✓ Riscaldamento globale (5-8°C) (DW 5-6°C; SST: quasi 8°C) con le temperature più alte degli ultimi 60-70 myr e paragonabili a quelle previste in alcuni modelli di previsione futura

- ✓ L’escursione negativa globale (2-4‰) degli isotopi del carbonio (CIE, Carbon Isotope Excursion) è rapida (oltre che di breve durata e transitoria) indica un’alterazione del ciclo del carbonio simile (nella sua rapidità e intensità) a quella antropica con l’uso dei combustibili fossili

- ✓ Significativi cambiamenti nella biosfera

- ✓ Intensificazione del ciclo idrologico

Viste le conseguenze sull'ambiente e le risposte della biosfera, ecco ALTRE DOMANDE SUL PETM

Da dove ("*source*") veniva tutto quel carbonio "leggero" e quale è stata la causa ("trigger") che lo ha messo in circolo così rapidamente?

Quale è stata la dinamica di questo evento climatico? E, soprattutto, in che tempi e con quali modalità il sistema è tornato alla "normalità"?

PETM:
SOURCE & TRIGGER

$CH_4\ nH_2O$

- Destabilizzazione dei gas idrati di metano (clatrati) *Dickens etal., 1995*
- Vulcanesimo *Bralower et al., 1997; Schmitz et al., 2004*
- Impatto di una cometa *Kent et al., 2003*
- *"Conflagration hypothesis"* - Combustione di depositi di torbe e carboni *Kurtz et al., 2003*
- Emissione massiccia di metano termogenico *Svensen et al., 2004*
- Disseccamento dei mari epicontinentali *Higgins & Schrag, 2006*

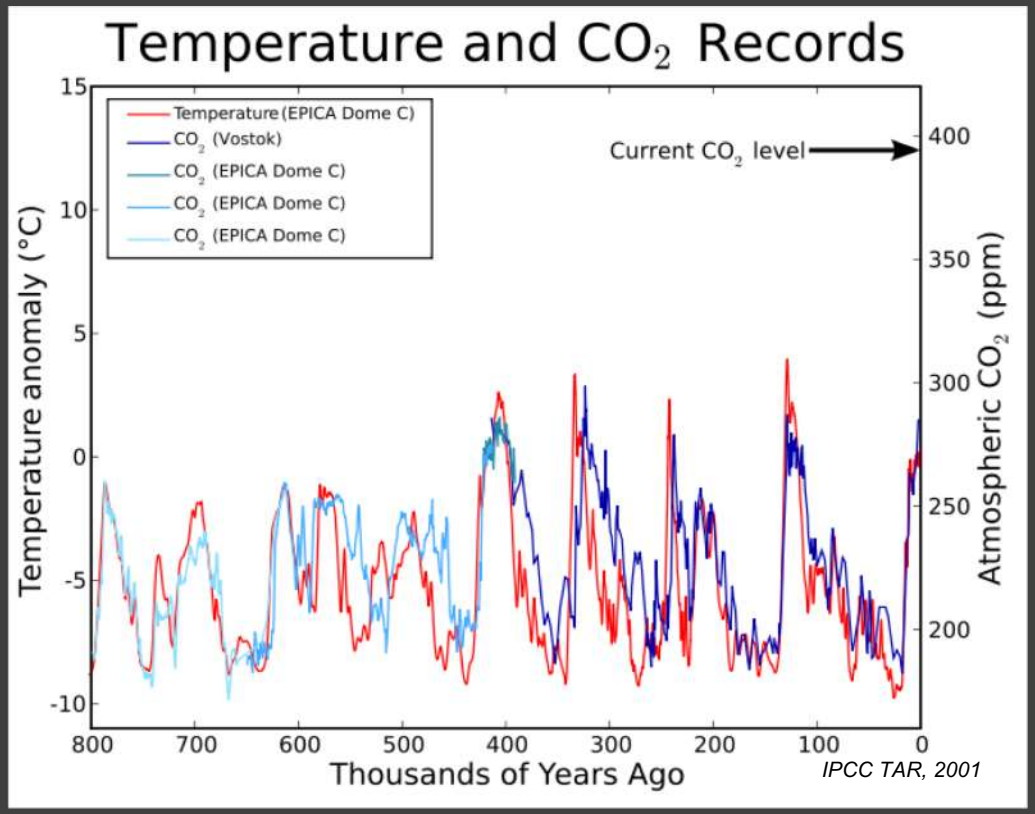
RIMANE UN MISTERO!

“FASCINO” DEL PETM

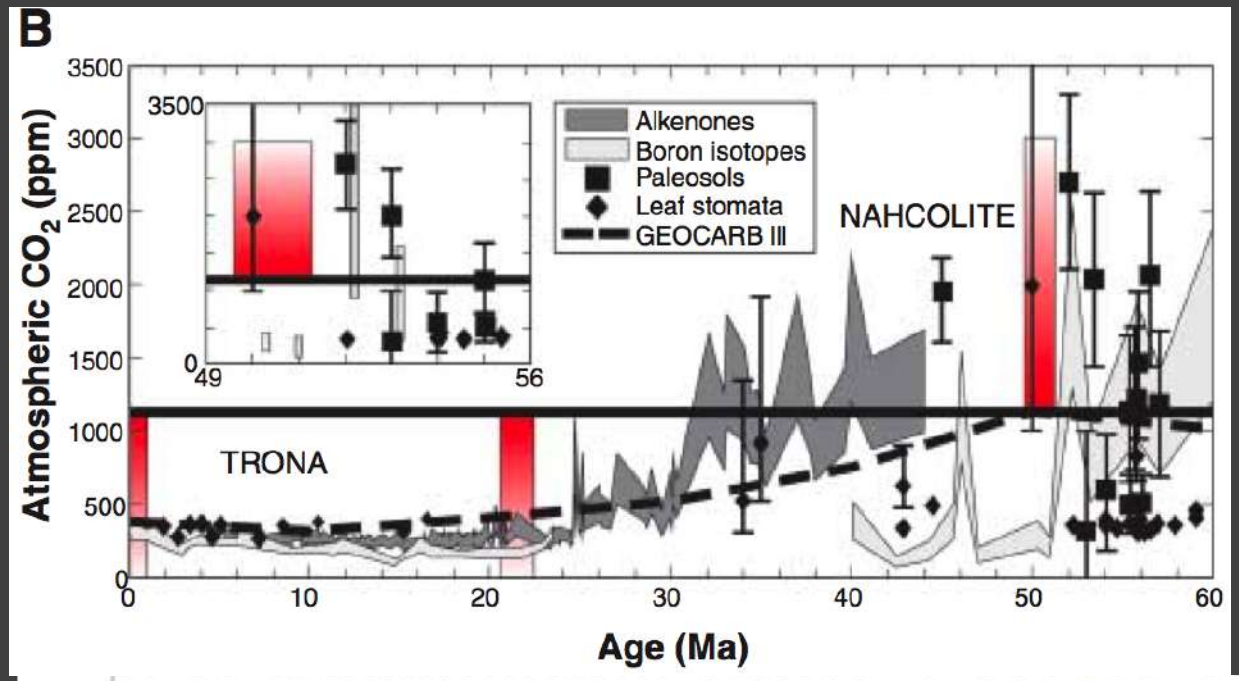
il PETM sembra un analogo nel passato
del nostro presente e futuro
COSA CI INSEGNA?

Un primo insegnamento:

c'è un legame stretto fra riscaldamento globale e ciclo del carbonio. Ce lo dicono anche i dati isotopici misurati sulle carote di ghiaccio …….

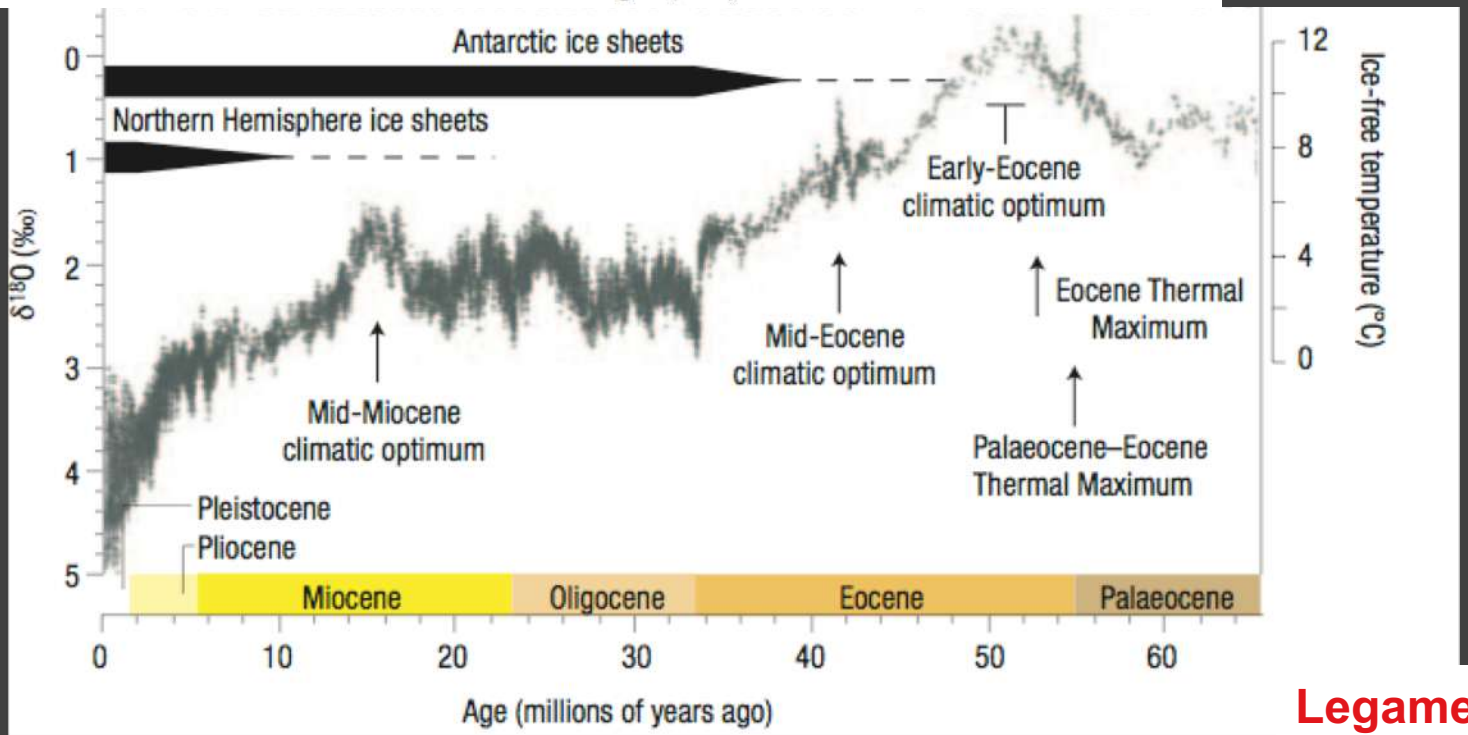


IPCC TAR, 2001

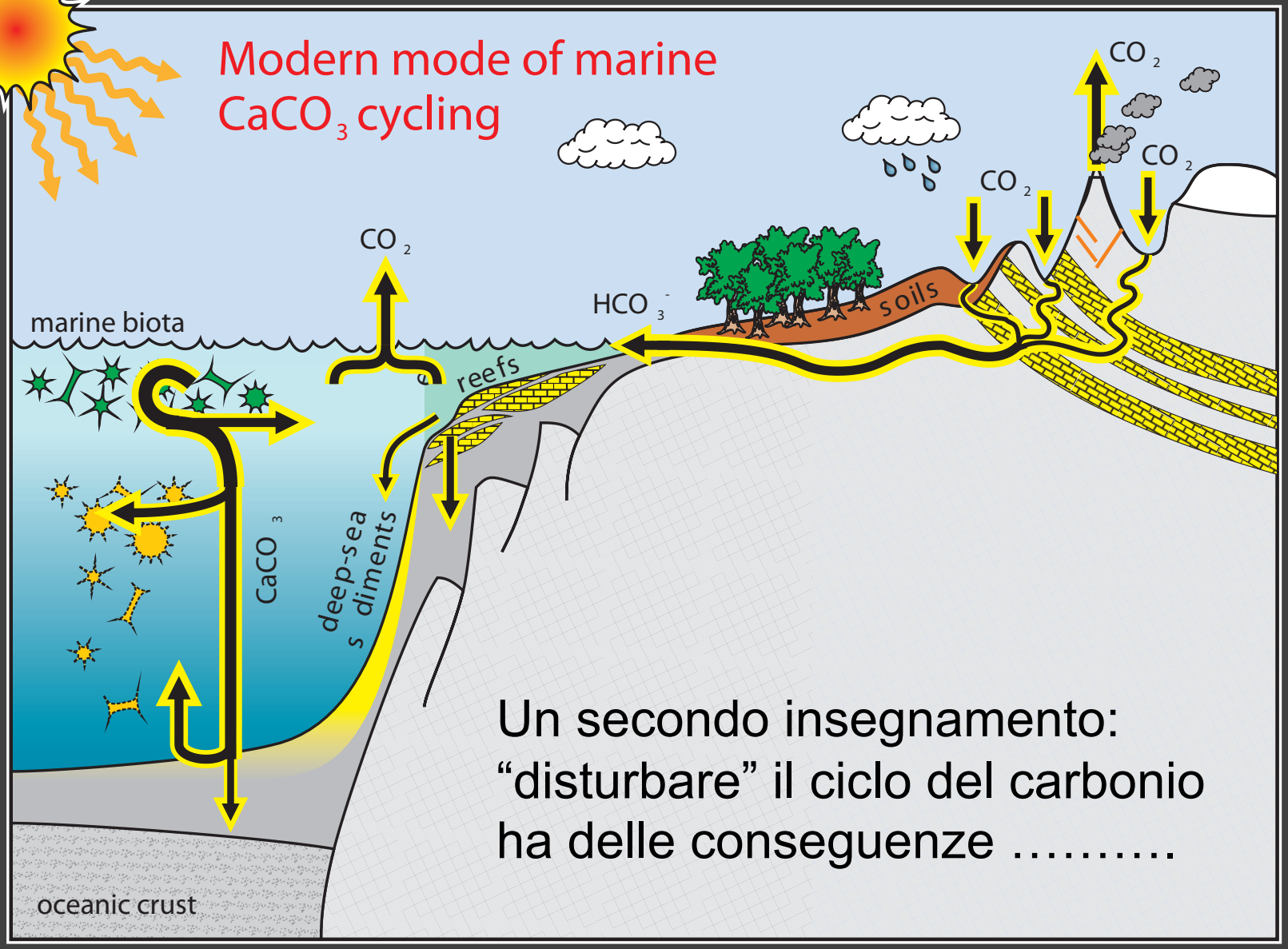


……. e i dati misurati sui sedimenti marini

- pCO_2 alto - caldo, assenza calotte/coperture glaciali
- pCO_2 basso - freddo, calotte/coperture glaciali



Legame pCO2 - CLIMA:

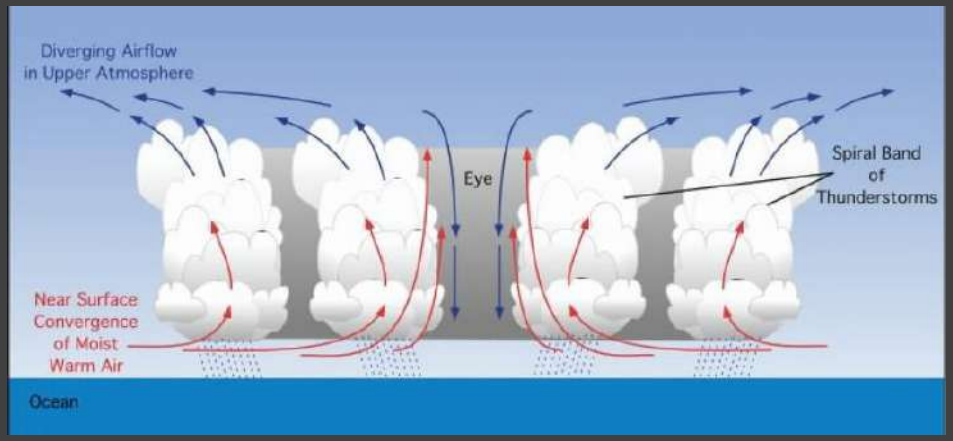


Un secondo insegnamento:
“disturbare” il ciclo del carbonio
ha delle conseguenze …….

le CONSEGUENZE

INTENSIFICAZIONE DEL CICLO IDROLOGICO E DEGLI EVENTI METEOROLOGICI ESTREMI (ES. URAGANI)

Numerosi studi indicano che il cambiamento del clima sta riscaldando le acque degli oceani, esacerbando di conseguenza l'energia distruttiva degli uragani.



In order to build up and intensify, hurricanes require warm ocean temperatures, moist air, and low vertical wind shear

The largest Atlantic hurricane on record, Hurricane Sandy reached over 1000 miles in diameter and made landfall in the U.S. on October 29, 2012.

https://www.ucsusa.org/global-warming/science-and-impacts/impacts/hurricanes-and-climate-change.html

le CONSEGUENZE

ACIDIFICAZIONE DEGLI OCEANI

I livelli crescenti di anidride carbonica riducono i livelli di pH negli oceani, con la conseguenza che l'acqua diventa sempre più acida. Se questo ciclo dovesse continuare, alcuni organismi marini fondamentali quali i coralli e alcuni organismi planctonici (che costituiscono il primo anello della catena alimentare oceanica), andranno incontro a problemi nel mantenere e costruire i loro scheletri di carbonato di calcio. Studi indicano che queste condizioni potrebbero svilupparsi entro qualche decennio, e non tra qualche secolo come si è creduto in precedenza.

le CONSEGUENZE

INSTABILITÀ DELLE COLTRI DI GHIACCIO CONTINENTALE

Dato forse più allarmante di tutti, la Nasa ha registrato alcune immagini dai satelliti dalle quali si può notare che la coltre di ghiaccio della Groenlandia è molto più instabile di quanto si supponesse finora. I ricercatori di Harvard hanno raccolte le prove di terremoti verificatisi nel ghiaccio che hanno fatto registrate scosse tra i 4,0 e i 5,0 gradi della scala Richter. Ciò si somma al collasso di parti di ghiaccio vaste quanto Rhode Island che si sono staccate dalle penisola antartica, dando vita a ulteriori preoccupazioni per la stabilità dello strato di ghiaccio dell'Antartico Occidentale.

CRESCITA DEL LIVELLO DEL MARE

Può avvenire a seguito dell’espansione termica degli oceani con il “global warming” e (in tempi più lunghi) dello scioglimento delle calotte della Groenlandia e di parte almeno dell’Antartide. Se dovessimo destabilizzare e lasciar sciogliere la coltre di ghiaccio alta tremila metri che ricopre la Groenlandia o una parte dell'altrettanto enorme massa di ghiaccio dell'Antartico Occidentale, in entrambi i casi il livello delle acque oceaniche salirebbe in tutto il mondo di oltre sei metri.

CONCLUSIONI

«Whereas in the past human impacts were local, reversible, and escapable through migration, they are now typically, global, irreversible, and inescapable»

Paul Ehrlich

CONCLUSIONI

“These expanding efforts to understand climate change have led to a scientific revolution that has accelerated through the late 20th century and into the new century. The mystery of climate change yields his secrets slowly, and many important questions still remain unanswered, but the revolution in knowledge has been immense”.

William F. Ruddiman, 2000